

Application de la méthode « bilan carbone® » aux activités de gestion des déchets



**APPLICATION DE LA METHODE BILAN CARBONE®
AUX ACTIVITES DE GESTION DES DECHETS**

RAPPORT FINAL

février 2009

**E. LABOUZE, A. BETON, J.-C. MICHAUD,
M. HESTIN – Bio Intelligence Service**



Créée en 1989 à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD – REseau COopératif de Recherche sur les Déchets et l'Environnement – est le fruit d'une triple coopération entre industriels, pouvoirs publics et chercheurs. L'objectif principal de RECORD est le financement et la réalisation d'études et de recherches dans le domaine des déchets et des pollutions industrielles.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et organismes publics) définissent collégalement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Application de la méthode Bilan Carbone® aux activités de gestion des déchets, 2009, 133 p, n°07-1017/1A

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
www.ademe.fr

© RECORD, 2009

RESUME

La méthode « Bilan Carbone® » développée par l'ADEME a pour objectif de permettre à toute activité industrielle ou tertiaire d'estimer les émissions de gaz à effet de serre (GES) qui résultent des processus physiques nécessaires à son existence, où que ces processus aient lieu. Concernant les activités liées à la gestion des déchets, la méthode Bilan Carbone® propose des facteurs d'émissions génériques ou spécifiques présentés par fraction et/ou par filière au sein de la « section déchet » du guide.

Ces facteurs ont connu peu de modifications depuis leur première compilation en 2001 et ne s'appliquent pas spécifiquement à des activités de traitement de déchets, mais plutôt à la gestion des déchets d'autres activités. Face à ce constat et aux nombreuses problématiques soulevées par la comptabilisation des émissions de GES du secteur des déchets, l'étude vise à actualiser la section déchet du guide et à faciliter l'appropriation de la méthode par les industriels du secteur qui souhaiteraient réaliser un Bilan Carbone® de leurs installations.

L'étude se décompose en trois phases. Dans une première partie, une analyse critique des facteurs existants est présentée. Suite à une revue bibliographique exhaustive, les facteurs d'émissions du guide sont complétés et actualisés dans une deuxième phase. La dernière partie de l'étude soulève et résout les problèmes méthodologiques que peuvent rencontrer les industriels du déchet réalisant leur Bilan Carbone® et propose des pistes d'amélioration de la méthode.

MOTS CLES

Bilan Carbone®, gaz à effet de serre, facteurs d'émission, traitement des déchets

SUMMARY

The « Bilan Carbone® » is a guide developed by the ADEME (French Environment Agency) to help businesses and local authorities estimate the greenhouse gases (GHG) emissions resulting from the physical processes necessary for their existence, wherever these processes take place. Regarding waste management, the "Waste Section" of the Bilan Carbone® contains both generic and specific emission factors, classified by type of waste and/or treatment.

These factors have not been modified since the first 2001 edition of the guide. Moreover, the method is not specifically adapted for the evaluation of GHG emissions from waste treatment activities. Therefore the purpose of the present study is to analyse and update the emissions factors proposed by the guide, and to identify the main methodological issues that have to be considered when applying the method to waste treatment activities.

The study is divided into three phases. First, a critical analysis of existing factors is presented. Then, following a comprehensive literature review, emission factors of the guide are completed and updated. The last part of the study raises and addresses the methodological problems that can meet waste management professionals when using the Bilan Carbone®.

KEY WORDS

Bilan Carbone®, greenhouse gases, emission factors, waste management

SOMMAIRE

I	CONTEXTE, OBJECTIFS ET CONTENU DU PRESENT RAPPORT	6
I.1	Contexte et objectifs	6
I.1.1	La méthode Bilan Carbone® et les déchets	6
I.1.2	Objectifs	6
I.2	Contenu du rapport	7
I.3	Définitions, points méthodologiques généraux et périmètres	8
I.3.1	Carbone biogénique et traitement des déchets	8
I.3.2	Précisions méthodologiques sur les facteurs de réchauffement climatique	10
I.3.3	Périmètre et terminologie : le Protocole EpE "déchet"	11
I.3.4	Emissions évitées par la valorisation énergétique : choix d'un facteur d'émission	13
I.3.5	Incertitudes	14
II	PHASE 1&2 : ANALYSE DES FACTEURS D'EMISSIONS DES ACTIVITES DE GESTION DES DECHETS ET ACTUALISATION	16
II.1	Méthodologie	17
II.2	Facteurs d'émissions de la Section <i>Matières Premières</i> : Cas du recyclage	18
II.2.1	Acier et métaux ferreux	21
II.2.2	Aluminium	25
II.2.3	Plastiques	28
II.2.4	Verre	40
II.2.5	Papier et carton	45
II.2.6	Recyclage : Limites et axes d'amélioration	48
II.3	Facteurs d'émissions de la <i>Section Déchets</i>	51
II.4	Facteurs d'émissions de la Section Déchets : Incinération	52
II.4.1	Présentation de la filière	52
II.4.2	Analyse des facteurs d'émissions du Bilan Carbone®	53
II.4.3	Actualisation	57
II.5	Facteurs d'émissions de la Section Déchets : Enfouissement	69
II.5.1	Présentation de la filière	69
II.5.2	Analyse des facteurs d'émissions du Bilan Carbone®	70
II.5.3	Actualisation	74
II.6	Autres axes d'amélioration	83
II.6.1	Transports	83
II.6.2	Complément : cas de la méthanisation	87
II.6.3	Complément : cas du compostage	90
II.7	Répartition française et valeurs moyennes	95
II.8	Synthèse	98

II.8.1	Recyclage	98
II.8.2	Incinération	100
II.8.3	Enfouissement	102
II.8.4	Traitements biologiques	104
II.8.5	Collecte et transports amonts.....	104
III	PHASE 3 : REFLEXION METHODOLOGIQUE, APPROPRIATION DE LA METHODE BILAN CARBONE® PAR LES INDUSTRIELS DU TRAITEMENT DES DECHETS.....	105
III.1	Spécificités des métiers du déchet et principes de la méthode Bilan Carbone®	105
III.1.1	Rappel des objectifs et principes de la méthode Bilan Carbone®	105
III.1.2	Pourquoi une lecture particulière de la méthode est-elle justifiée ?.....	106
III.1.3	Quels sont les paramètres critiques issus des approches ACV ?.....	107
III.2	Difficultés méthodologiques et préconisations pour les industriels du déchet	110
III.2.1	Postes génériques et préconisations pour toutes activités de traitement	110
III.2.2	Emissions directes dues au déchets	113
III.2.3	Emissions évitées : valorisation matière et énergétique, séquestration.....	116
III.3	Valorisation matière et énergétique : cas des autres acteurs aval et amont.....	124
III.3.1	Valorisation matière	124
III.3.2	Valorisation énergétique	125
III.4	Synthèse	126
	ANNEXE : REFLEXION METHODOLOGIQUE COMPLEMENTAIRE SUR LE RECYCLAGE	128

I CONTEXTE, OBJECTIFS ET CONTENU DU PRESENT RAPPORT

I.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS

I.1.1 LA METHODE BILAN CARBONE® ET LES DECHETS

La méthode « Bilan Carbone® » développée par l'ADEME a pour objectif de permettre à toute activité industrielle ou tertiaire d'estimer les émissions de gaz à effet de serre (GES) qui résultent des processus physiques nécessaires à son existence, où que ces processus aient lieu. La méthode englobe les émissions directes de l'activité considérée mais aussi les émissions indirectes résultant de processus nécessaires à l'activité (transports, fabrication des matériaux). Dans la très grande majorité des cas il n'est pas envisageable de mesurer directement les émissions de GES résultant d'une action donnée. La seule manière d'estimer ces émissions est souvent de les obtenir par le calcul, à partir de données dites d'activité : nombre de camions qui roulent et distance parcourue, nombre de tonnes d'acier achetées, etc. La méthode Bilan Carbone® a précisément été mise au point pour permettre de convertir ces données d'activités en émissions estimées de GES, exprimées en équivalent carbone, en utilisant pour ce faire **des paramètres de conversion** ou **facteurs d'émission**.

Concernant les activités liées à la gestion des déchets, la méthode Bilan Carbone® propose des facteurs d'émissions génériques ou spécifiques présentées par fraction et/ou par filière au sein de la « section déchet » du guide. De plus, en raison de choix méthodologiques liés à la quantification des bénéfices du recyclage, certains facteurs d'émission sont eux présentés au sein de la section « matière première » du guide.

Outre le grand nombre de variétés de déchets aux propriétés très différentes, certains déchets peuvent présenter la particularité d'être à la fois sources directes et indirectes d'émissions de GES. Pour faire le Bilan Carbone® d'une filière de traitement de déchets, il convient donc de décrire les étapes de l'activité considérée de manière fine (consommations énergétiques et de matières premières, émissions, etc.) et d'utiliser des facteurs d'émissions qui soient les plus pertinents possibles. Or, qu'ils soient issus de la littérature ou spécialement mis au point pour cette méthode, les facteurs d'émission sont souvent le fruit d'approximations. En outre, les facteurs d'émission « déchets » de la méthode ADEME ne s'appliquent pas spécifiquement à des activités de traitement de déchets, mais plutôt à la gestion des déchets d'autres activités.

I.1.2 OBJECTIFS

Les facteurs du guide ont connu peu de modifications depuis leur première compilation en 2001. Face à ce constat et aux nombreuses problématiques soulevées par la comptabilisation des émissions de GES du secteur des déchets, RECORD a mandaté BIO Intelligence Service afin de réaliser une analyse critique et une actualisation du guide actuel et d'engager une véritable réflexion méthodologique quant à l'applicabilité de la méthode Bilan Carbone® à des activités de traitement des déchets. Pour cela, les trois objectifs de l'étude sont :

Phase 1 : Réaliser une analyse critique des facteurs d'émissions du guide actuel relatif à la gestion des déchets et identifier les lacunes et axes d'amélioration du guide actuel

Phase 2 : Sur la base d'une revue bibliographique exhaustive de la bibliographie disponible au niveau national et international, actualiser les facteurs d'émissions actuels et proposer des possibilités d'améliorations du guide actuel.

Phase 3 :

Phase 3 : Mettre en lumière les lacunes actuelles de la méthode et les points méthodologiques critiques qu'il conviendrait de combler pour permettre aux métiers du déchet de s'approprier la méthode Bilan Carbone®.

L'étude a été effectuée sur la version 5.0 du Guide des Facteurs d'Emissions (2007).

I.2 CONTENU DU RAPPORT

Ce rapport s'organise de la façon suivante :

- Phase 1 :
 - Précisions méthodologiques génériques sur les émissions de GES des différents traitements des déchets
 - Analyse critique de l'ensemble des facteurs d'émissions relatifs aux déchets du guide actuel (sections « déchets » et « matières premières » pour le recyclage) via une analyse aussi fine que possible des sources primaires
 - Identification des lacunes et des axes d'amélioration
- Phase 2 :
 - Description de la méthodologie de recherche bibliographique adoptée
 - Analyse transversale des données de la littérature, identification des données les plus consensuelles ou des méthodologies les plus adaptées à l'actualisation du guide, proposition de facteurs actualisés
- Phase 3 :
 - Identification des paramètres et points méthodologiques clés pour l'application de la méthode Bilan Carbone® aux activités de gestion des déchets, afin de faciliter l'appropriation de la méthode par les industriels du secteur.

I.3 DEFINITIONS, POINTS METHODOLOGIQUES GENERAUX ET PERIMETRES

L'analyse critique qui a été réalisée dans cette étude s'inscrit dans le même cadre méthodologique que la méthode Bilan Carbone®. Compte tenu de l'importance de certaines hypothèses sur les facteurs d'émissions, les principaux points de ce référentiel méthodologique et quelques définitions adoptées dans le présent rapport sont rappelés ci-après.

I.3.1 CARBONE BIOGENIQUE ET TRAITEMENT DES DECHETS

I.3.1.1 CYCLES DU CARBONE

Le cycle du carbone est un cycle biogéochimique particulièrement complexe et résulte des divers échanges entre l'hydrosphère (océans), la lithosphère (roches), la biosphère (matière vivante) et l'atmosphère.

Le carbone contenu dans les déchets traités peut se transformer en dioxyde de carbone (CO₂) ou en méthane (CH₄). Dans le cas des matériaux biodégradables tels que les déchets putrescibles ou les papiers, le carbone provient initialement du CO₂ de l'atmosphère assimilé lors de la croissance des végétaux via la photosynthèse. Ainsi le carbone d'origine biomasse réémis sous forme de CO₂ lors du traitement des déchets réintègre le cycle naturel du carbone. Pour ce cycle court du carbone, l'effet net est nul, les émissions de CO₂ ayant été compensées par une assimilation préalable équivalente. Ces émissions de CO₂, sont dites « à court termes » ou « biogéniques ». Le CH₄ biogénique est en revanche comptabilisé, car le PRG du méthane est plus important que celui du CO₂, et que ce PRG additionnel est attribuable à des activités humaines.

En revanche, dans certains matériaux (plastiques, tissus,...), le carbone est d'origine fossile et provient de réserves formées à des échelles de temps géologiques (plusieurs millions d'années). Au vu de la lenteur et des faibles échanges naturels entre les réservoirs fossiles et l'atmosphère, le carbone fossile est quasiment définitivement piégé. Ainsi, la combustion de carburant fossiles (ou de composés dont le carbone est d'origine fossile) perturbe le cycle du carbone et contribue à l'effet de serre en déséquilibrant trop rapidement le contenu en carbone des différents réservoirs de la planète.

Le GIEC préconise ainsi de ne comptabiliser que les émissions de CO₂ fossile dans les inventaires de gaz à effet de serre, considérant que les émissions de CO₂ biogéniques ne perturbent pas le cycle naturel du carbone en équilibre quasi-stationnaire¹. En revanche, si le carbone issu de la biomasse est émis sous forme de méthane en raison des activités humaines, il convient de comptabiliser ces émissions compte tenu du fort pouvoir réchauffant de ce gaz. La méthode Bilan Carbone® utilise les mêmes hypothèses que le GIEC.

I.3.1.2 CAS DE LA SEQUESTRATION

D'un point de vue méthodologique, il est possible d'allouer un crédit d'émission lorsque du carbone biogénique (issu de la biomasse) sort du cycle court du carbone. En termes de gestion des déchets, cette observation aboutit à des difficultés de comptabilisation au niveau de l'enfouissement compte tenu du fait que les déchets fermentescibles ne se dégradent pas entièrement et qu'une partie du carbone peut donc être piégée.

La prise en compte du carbone séquestré est une pratique relativement courante dans les ACV traitant de la mise en centre de stockage ou du compostage. Elle résulte d'un bilan de conservation du carbone.

¹ IPCC (2006): Guidelines for National Greenhouse Gases Inventories, Volume 5, Chapter 1

- *Centre de stockage*

Dans le cadre d'un centre de stockage, ce bilan s'écrit par exemple:

$C_{total} = C_{émis}(\text{biogaz}) + C_{lixivié} + C_{séquestré}$

Compte tenu de la complexité et du dynamisme du profil d'émission du biogaz, la pratique la plus courante consiste à se placer dans une perspective suffisamment longue pour pouvoir considérer que le système est à l'équilibre. La séquestration est donc généralement calculée par différence lorsque les émissions totales dues aux déchets sur cette période ont été calculées. La considération du carbone séquestré dans le cas du centre de stockage est donc fortement liée aux choix méthodologiques de comptabilisation des émissions (totales des émissions futures dues aux déchets, émissions à un instant T des déchets enfouis précédemment).

Le stockage du carbone biogénique est comptabilisé dans la majorité des études. Le rapport de l'USEPA¹, basé sur les travaux de Barlaz et al.², considère que le carbone qui n'est pas émis sous forme de méthane ou de CO₂ est stocké. Les pertes de carbone à travers les fuites de lixiviat sont en effet considérées comme étant très faibles (moins de 1%).

Le GIEC³ recommande une approche similaire, en considérant que le carbone qui n'est pas décomposé est stocké à long terme dans la décharge.

- *Compostage*

De la même manière, une partie du carbone contenu dans le compost épandu dans les champs n'est pas minéralisée au bout d'une longue période. Le GIEC⁴ reconnaît le stockage du carbone dans les sols comme une des trois mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur agricole.

L'étude AEA⁵ prend en compte cette séquestration en évaluant le temps de résidence du carbone du compost dans les sols, puis calculant le taux de séquestration sur une période de 100 ans, ce qui représente l'horizon de temps auquel le GIEC se place, par convention, pour évaluer les effets des émissions de GES. Les résultats sont encore une fois très dépendants de la période considérée.

- *Choix pour cette étude*

La méthode Bilan Carbone® aborde les problématiques de capture et stockage du carbone (CSS) mais ne mentionne pas de marche à suivre concernant la séquestration « naturelle » du carbone qui correspond à du stockage de carbone biogénique. Etant donné que certains facteurs d'émissions du guide actuel mentionnent explicitement la **prise en compte de la séquestration du carbone** (enfouissement des fermentescibles), les émissions évitées par la séquestration ont été intégrées dans les facteurs actualisés.

Il convient de noter cependant que les incertitudes liées au calcul du carbone séquestré sont assez élevées. En effet, les paramètres de calcul (contenu en carbone dégradable, taux de dégradation,...) sont principalement issus de mesures en conditions contrôlées qui ne peuvent refléter que partiellement les conditions réelles et la complexité des mécanismes en jeu.

Dans ce contexte, il peut être souhaitable de présenter isolément les émissions évitées par la séquestration.

¹ USEPA (2006): Solid waste management and greenhouse gases

² Barlaz et al. (1997): Biodegradative analysis of municipal solid waste in laboratory scale landfills

³ IPCC (2006): Guidelines for National Greenhouse Gases Inventories, Volume 5, Chapter 3

⁴ IPCC (2007): Climate change 2007 – Mitigation of climate change: Chapter 8, Agriculture

⁵ AEA Technology, Waste management options and climate change, 2001

I.3.2 PRECISIONS METHODOLOGIQUES SUR LES FACTEURS DE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE

La méthode Bilan Carbone® considère les six gaz à effet de serre du protocole de Kyoto:

- le dioxyde de carbone (CO₂),
- le méthane (CH₄),
- le protoxyde d'azote (N₂O),
- les hydrocarbures fluorés (HFC),
- les hydrocarbures perfluorés (PFC)
- l'hexafluorure de soufre (SF₆).

Les six gaz à effet de serre considérés par le protocole de Kyoto ne constituent pas une liste exhaustive. La vapeur d'eau dans la stratosphère (émissions des avions) et les chlorofluorocarbones (CFC) sont hors protocole mais contribuent à l'effet de serre. Dans la mesure où le niveau des connaissances scientifiques le permet, tous les GES sont donc considérés dans la méthode Bilan Carbone®.

L'agrégation des émissions en équivalent CO₂ est effectuée en utilisant les facteurs d'équivalence dits de « Pouvoir de Réchauffement Global (PRG) définis dans le Second Rapport du GIEC (1996)¹ à l'horizon 100 ans.

Pour rappel, ces facteurs ont été réévalués dans le Troisième Rapport² (2001) et dans le Quatrième Rapport du GIEC³. Ces facteurs sont rappelés ci-après :

Tableau 1: Pouvoirs de réchauffement global du méthane, et du protoxyde d'azote des Deuxième, Troisième et Quatrième Rapports du GIEC

Gaz	Second Rapport (1996) Horizon temporel			Troisième Rapport (2001) Horizon temporel			Quatrième Rapport (2007) Horizon temporel		
	20 ans	100 ans	500 ans	20 ans	100 ans	500 ans	20 ans	100 ans	500 ans
CH ₄	56	21	6	62	23	7	72	25	7.6
N ₂ O	280	310	170	275	296	156	289	298	153

Dans l'optique d'actualiser la méthode Bilan Carbone®, il a été considéré qu'il était pertinent lorsque les informations le permettaient d'**utiliser les tous derniers facteurs du GIEC**, en revanche, dans la phase d'analyse critique des facteurs actuels, ce sont les facteurs du troisième rapport qui ont été utilisés, comme dans la version actuelle.

Note : La prise en compte de facteurs de PRG à horizon court (20 ans) permettrait de mettre davantage en exergue le fort pouvoir du méthane sur ces périodes. Toutefois, le choix effectué a consisté à respecter les conventions du GIEC et d'utiliser les valeurs de PRG à 100 ans.

¹ IPCC (1996), Revised IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Reference Manual

² IPCC (2001), Third Assessment Report. The Scientific Basis, Working Group I: The Scientific Basis, Chapter 6: Radiative Forcing of Climate Change

³ IPCC(2007), Fourth Assessment Report, Working Group I: The Physical Science Basis, Chapter 2: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing

I.3.3 PERIMETRE ET TERMINOLOGIE : LE PROTOCOLE EpE “DECHET”

Avec une volonté d'utiliser un cadre commun pour quantifier les émissions de gaz à effet de serre, Entreprises pour l'Environnement (EpE) a établi en 2001 un protocole de Quantification, Reporting et Vérification des émissions de gaz à effet de serre (REGES). Un volet du protocole est consacré aux activités de traitement des déchets afin d'homogénéiser les méthodes de calcul, et d'assurer la fiabilité, la transparence et la vérifiabilité des émissions de GES de la filière. Le protocole EpE, tout comme la méthode Bilan Carbone®, est compatible avec les cadres de la norme ISO 14064 et du GHG Protocol. Les grandes lignes de ce protocole spécifique au traitement des déchets sont rappelées ici étant données leur pertinence pour notre étude. L'objectif étant d'une part de donner une première vue d'ensemble des émissions comptabilisées par une méthodologie faisant référence dans le secteur et d'autre part d'adopter un cadre terminologique.

Le protocole couvre les émissions liées aux transports, aux consommations de carburants et d'électricité, les émissions liées au processus de traitement mais également les émissions évitées par la production d'énergie ou par le recyclage. Les gaz à effet de serre suivants sont considérés : le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O). Concernant le N₂O seule l'incinération des ordures ménagères est prise en compte en raison des importantes incertitudes liées à l'évaluation de ces émissions pour les autres filières, notamment biologiques.

Suivant le protocole EpE, la réalisation d'un inventaire exhaustif des émissions de GES nécessite de couvrir les types d'émission suivants:

- *Les émissions directes*

Il s'agit d'émissions provenant de process ou d'équipements contrôlés par l'entité : émissions provenant des installations de combustion, dégagement gazeux des centres de stockage mais aussi utilisation de carburants sur le site par exemple.

- *Les émissions indirectes*

Il s'agit d'émissions liées à l'activité de l'entité, mais provenant de sites ou d'opérations possédés par une entité autre. Par exemple, un site de compostage consomme de l'électricité, dont la production génère des émissions de GES. Du point de vue du site de compostage, ces émissions sont indirectes, car liées à son activité, mais ayant lieu sur un autre site. Les émissions de GES lors de la production des réactifs chimiques utilisés dans le traitement des déchets constituent un autre exemple d'émissions indirectes.

- *Les émissions évitées :*

Les activités liées à la gestion des déchets permettent, dans certains cas, soit la génération d'énergie, soit la réutilisation de matériau ou de combustible. De ce fait, les émissions de gaz à effet de serre liées à la production d'une quantité équivalente d'énergie ou de matériau au moyen de matières premières ou d'énergie fossile se trouvent évitées.

Cette terminologie a été adoptée dans ce rapport, elle rejoint celle présentée dans le guide méthodologique de la méthode Bilan Carbone®.

Afin de présenter une première vision du périmètre que les facteurs d'émission doivent couvrir, les émissions comptabilisées par le protocole EpE sont données dans les tableaux suivants¹ :

¹ Dans le cadre du protocole EpE, les émissions sont calculées pour une période donnée, en fonction des données d'activités de l'installation de traitement des déchets. Cette approche est différente de celle du Bilan Carbone® qui calcule les émissions pour une quantité de déchet donnée, en particulier dans le cas de la mise en décharge, dont les émissions sont différées. La catégorisation des émissions présentée reste cependant pertinente, puisqu'elle adresse la nature physique des émissions plutôt que la méthodologie de calcul elle-même.

Tableau 2 : Emissions considérées dans le protocole EpE déchets

Activité	Emissions directes		Emissions indirectes	Emissions évitées
	Emissions brutes (carbone biogénique inclus)	Emissions nettes (carbone biogénique exclus)		
Transport lié à la collecte, au nettoyage, à l'assainissement¹	- CO ₂ des carburants	-CO ₂ des carburants	-CO ₂ lié aux véhicules électriques -CO ₂ lié au transport sous-traité	
Centre de stockage des déchets (centre d'enfouissement) en activité	- CH ₄ du biogaz - CO ₂ du biogaz	-CH ₄ non capté (basé sur l'utilisation de modèles de calcul) -CO ₂ de la consommation des engins	-CO ₂ lié à la consommation d'électricité achetée	-CO ₂ évité lié à la production d'énergie
Incinération	- CO ₂ (provenant des déchets et de l'appoint en énergie fossile) - CO ₂ provenant de la décarbonatation lors du traitement des fumées -N ₂ O	-CO ₂ provenant des déchets (hors fraction provenant de la biomasse) et des énergies fossiles d'appoint. -Le CO ₂ de la décarbonatation est considéré comme négligeable. -N ₂ O	-CO ₂ lié à la consommation d'électricité achetée -CH ₄	-CO ₂ évité lié à la production d'énergie -CO ₂ évité lié au recyclage des mâchefers et ferrailles
Valorisation biologique²	-CO ₂ d'origine biomasse -CH ₄ considéré comme négligeable pour des pratiques normales	-CH ₄ considéré comme négligeable pour des pratiques normales -CO ₂ de la Consommation des engins	-CO ₂ lié à la consommation d'électricité achetée	-CO ₂ évité lié à la production d'énergie.
Incinération des déchets dangereux	-CO ₂ de la combustion -CO ₂ issu de l'incinération des COV, considéré comme négligeable.	-CO ₂ de la combustion	-CO ₂ lié à la consommation d'électricité achetée	-CO ₂ évité lié à la production d'énergie.
Tri et Recyclage et valorisation	-CO ₂ provenant des combustibles	-CO ₂ provenant des combustibles	-CO ₂ lié à la consommation d'électricité achetée	-GES évités associés à la production d'une quantité de matériaux équivalents. -CO ₂ évité lié à la production éventuelle de combustibles de récupération

¹ Cette catégorie inclut les moteurs auxiliaires et les véhicules légers de service et de fonction.

² Les émissions éventuelles de N₂O ne sont pas prises en compte à l'heure actuelle, en l'absence de méthode fiable de quantification et en l'absence d'études montrant que leurs présences sont significatives. Le protocole sera mis à jour si les émissions sont significatives et si une méthode fiable et reconnue existe.

I.3.4 EMISSIONS EVITEES PAR LA VALORISATION ENERGETIQUE : CHOIX D'UN FACTEUR D'EMISSION

I.3.4.1 EMISSIONS EVITEES PAR LA VALORISATION ELECTRIQUE

Le Bilan Carbone®, dans sa version actuelle, calcule les émissions évitées par valorisation électrique sur la base du contenu carbone moyen du mix électrique français, estimé à 23 g éq C par kWh. Ce facteur est tiré de la base de données publiée en 2004 par l'IEA. Il s'agit du contenu moyen en carbone du kilowatt heure électrique.

Le contenu carbone de l'électricité française est l'objet de nombreuses réflexions, étant donnée sa forte variabilité horosaisonnaire, due à la forte dispersion des contenus entre, par exemple, les parcs nucléaires et hydrauliques (dont les émissions sont négligeables), et les centrales à charbon (dont le contenu est d'environ 250g éq C/kWh).

Une des méthodes proposée par l'ADEME pour résoudre ce problème est la **méthode des contenus saisonnalisés par usage**. Cette méthode distingue deux régimes de fonctionnement du système de production d'électricité:

- un régime dit « saisonnalisé », avec un contenu en carbone élevé, pour refléter l'adaptation du système électrique aux variations saisonnières de la demande en chauffage et en éclairage,
- un régime fixe avec un contenu en carbone faible.

Le régime « saisonnalisé » représente 20% de la production et 50% des émissions. Les contenus d'émission par usage sont obtenus en attribuant à chacun des usages un coefficient de saisonnalité, reflétant des profils de consommation faisant plus ou moins appel aux moyens de production «saisonnalisés ». Une série de 4 indicateurs a été proposée :

Tableau 3: Contenu carbone de l'électricité française selon la méthode des contenus saisonnalisés par usage (source ADEME¹)

Usage	Chauffage	Eclairage	Usages "intermittents"	Usages "en base"
Contenu carbone (g éq CO₂/kWh)	180	100	60	40
Contenu carbone (g éq C/kWh)	49	27	16	11

Cette méthode reflète le fonctionnement du système électrique français sur la période 2000-2004, mais ne permet pas de calculer les émissions évitées dues à la mise en service de sources d'électricité alternatives ou renouvelables.

La méthode du contenu marginal, elle repose sur le principe suivant : chaque incrément de consommation entraîne la sollicitation supplémentaire de moyen de production marginal. La sollicitation des moyens de production pour satisfaire un incrément de demande respecte un ordre économique établi en fonction des coûts proportionnels de production de chaque installation. Au plus bas de l'empilement se trouvent les productions fatales (éolien, hydraulique au fil de l'eau), suivent le nucléaire, puis le charbon et les cycles combinés au gaz, et enfin le fioul et les turbines à combustion (TAC). Ainsi, à chaque instant, un accroissement de la demande se traduira par la sollicitation du moyen de production le moins cher disponible à la hausse. De même, une baisse de consommation, liée par exemple à l'installation de sources d'énergies renouvelables ou à des actions de maîtrise de l'énergie, entraîne une réduction de puissance du moyen de production marginal. Une note² publiée par le RTE (Réseau de Transport d'Electricité) et l'ADEME propose une valeur de **136g éq C/kWh**.

¹ ADEME (2005), Note de cadrage sur le contenu CO₂ du kWh par usage en France

² RTE, ADEME(2007), Le contenu en CO₂ du kWh électrique : Avantages comparés du contenu marginal et du contenu par usages sur la base de l'historique.

Cette méthodologie cherche en priorité à évaluer les conséquences de décisions qui peuvent être prises au cours des années à venir et se place donc dans une approche prospective.

Dans le cas du Bilan Carbone®, on se place plutôt d'un point de vue micro-économique (à l'échelle d'une entreprise ou d'une collectivité) et dans une approche « statique », l'idée étant d'effectuer une photographie des émissions à un instant donné. Or la méthode du contenu marginal s'appréhende plutôt d'un point de vue macro-économique ou pour l'élaboration de scénarios dynamiques. Pour cette raison, et pour conserver une certaine cohérence avec la méthodologie générale du Bilan Carbone®, nous adopterons dans cette étude la valeur moyenne du contenu électrique de **23g éq C/kWh** actuellement utilisée pour calculer les émissions évitées.

1.3.4.2 EMISSIONS EVITEES PAR LA VALORISATION THERMIQUE

Les émissions évitées par valorisation thermique sont généralement moins sujet à controverse, et **l'approche idéale à employer est une approche au cas par cas**. On cherchera donc, à chaque fois que de la chaleur est produite lors d'un processus de traitement des déchets, à déterminer la source remplacée la plus appropriée au contexte local.

Dans le cas où les informations seraient indisponibles, **la valeur par défaut sera celle du contenu carbone du mix thermique européen, soit 76 g éq C/kWh¹** qui peut être appliqué à la France, les technologies de production de chaleur étant relativement semblables d'un pays à l'autre.

A titre comparatif, le tableau ci-dessous recense quelques facteurs associés à des technologies spécifiques.

Tableau 4: Facteurs d'émission associés à différents mode de production de chaleur

Source d'énergie thermique	Facteur d'émission g éq C /kWh	Source
Chaudière au fuel	73	ADEME et Gaz de France, <i>Rapport d'ACV des modes de valorisation énergétique du biogaz, 2007</i>
Chaudière au gaz naturel	55	
Chauffage collectif au fuel	134	ADEME et BIO Intelligence Service, <i>Rapport d'ACV du chauffage collectif et industriel au bois, 2005</i>
Chauffage collectif au gaz naturel	66	
Chauffage industriel au fuel	129	
Chauffage industriel au gaz naturel	63	
Chaleur, moyenne européenne	76	AEA Technology, <i>Waste management options and climate change, 2001</i>

1.3.5 INCERTITUDES

Les facteurs d'émission du Bilan Carbone® sont accompagnés d'une estimation de la marge d'erreur associée à chacun d'eux. Les incertitudes calculées sont rarement justifiées, ce qui rend difficile leur analyse.

Une estimation de l'incertitude liée à chacun des facteurs d'émission proposés est présentée dans cette étude. Les valeurs proposées ont été établies sur la base de la variabilité observée dans les publications étudiées, de la spécificité des études, et, le cas échéant, de la représentativité de l'échantillon statistique étudié. Les valeurs extrêmes ont été écartées lorsqu'elles étaient jugées peu fiables en raison d'un manque d'information sur leur périmètre d'application ou sur leur méthodologie de calcul.

¹ AEA Technology, Waste management options and climate change, 2001

En outre, on attribue arbitrairement une incertitude de 50% à toutes les émissions (directes ou évitées) issues de processus biologiques, afin de refléter la variabilité intrinsèque de ces processus, qui dépendent, la plupart du temps, de conditions extérieures difficilement contrôlables.

II PHASE 1&2 : ANALYSE DES FACTEURS D'EMISSIONS DES ACTIVITES DE GESTION DES DECHETS ET ACTUALISATION

Cette première partie a pour objectif d'analyser les facteurs d'émission actuels du guide en réalisant une analyse aussi fine que possible des sources primaires dont ils sont issus (phase 1). Plus précisément, cette analyse doit permettre de vérifier l'exactitude de ces facteurs, leur périmètre d'application et leurs limites éventuelles. Par ailleurs, afin d'orienter efficacement la recherche bibliographique, cette analyse critique a également été réalisée dans l'optique de **proposer des pistes d'amélioration pour combler les lacunes éventuelles**.

Puis, sur la base d'une revue bibliographique la plus exhaustive possible de la bibliographie disponible aux niveaux national et international, l'objectif de la phase 2 est de collecter et d'analyser les études et les données d'émissions de GES du secteur des déchets. Cette revue doit permettre d'actualiser et de compléter les facteurs d'émissions de la méthode Bilan Carbone® qui ont été analysés. Les facteurs ou méthodologies de calcul doivent ainsi rendre compte de l'ensemble des émissions générées par une filière de traitement des déchets.

Contenu :

- Précisions méthodologiques génériques sur les émissions de GES des différents traitements des déchets
- Analyse critique de l'ensemble des facteurs d'émissions relatifs aux déchets du guide actuel (sections « déchets » et « matières premières » pour le recyclage) via une analyse aussi fine que possible des sources primaires
- Identification des lacunes et des axes d'amélioration
- Description de la méthodologie de recherche bibliographique adoptée, liste des études et données identifiées.
- Analyse transversale des données de la littérature, identification des données les plus consensuelles ou des méthodologies les plus adaptées à l'actualisation du guide, proposition de facteurs actualisés.

II.1 METHODOLOGIE

Après une analyse critique des facteurs d'émissions utilisés dans la méthode Bilan Carbone® actuelle, le travail bibliographique visé dans le cadre de cette tâche a couvert l'ensemble des publications des acteurs concernés par le réchauffement climatique et les émissions de Gaz à Effet de Serre.

BIO Intelligence Service a réalisé pour la FNADE en 2007 une étude sur les émissions de gaz à effet de serre et le secteur des déchets. Cette étude incluait notamment un important travail bibliographique de collecte et d'analyse de données publiées qui a servi de base à la sélection des études les plus pertinentes pour cette étude. Une nouvelle recherche a cependant été effectuée afin de vérifier d'une part la complétude de cette analyse bibliographique et d'autre part de s'assurer que les études pertinentes postérieures à l'étude FNADE ont été incluses cette étude.

La recherche bibliographique a ainsi été orientée selon deux axes :

- une recherche de documents au sein de l'ensemble des acteurs et organisations françaises, européennes et internationales concernées par l'effet de serre et le réchauffement climatique ;
- une recherche de documents au sein des publications scientifiques internationales.

Acteurs et organisations internationales concernés par l'effet de serre et le réchauffement climatique

- Les entreprises gestionnaires de déchets (Suez Environnement, Veolia Environnement, Sécché Environnement, ...)
- Les syndicats des activités du déchet (FNADE, BDE (fédération allemande), FEAD (fédération européenne), ...) des principaux pays Européens
- Les ONG (Greenpeace, les amis de la Terre, ...)
- Les organismes publics (CITEPA, ADEME, Environment Protection Agency, Agence Européenne de l'Environnement, Commission Européenne, GIEC, UNFCC,...)

Publications scientifiques internationales.

L'identification des ressources documentaires au sein des publications internationales a été effectuée à l'aide de l'utilisation des mots clés suivants: associés selon leur pertinence: waste, waste management, incineration, recycling landfilling, recycling, Life Cycle Analysis, LCA, emission factors, greenhouse gas, global warming.

Les principaux points d'entrée des éditeurs et les bases de données de référencement bibliographique majeures ont été exploités: Compendex, IOP Journals, Inspec, Intute: Science, Engineering, & Technology, METADEX (CSA), NTIS, Science Direct (Elsevier), Springer, Blackwell, ESA, GoogleScholar, PUbMed, SwetsWise, Web of Science (ISI), JSTOR, EBSCO, Wiley Interscience JournalsACM Digital Library, MEDLINE.

Les données issues de la littérature ont ensuite été analysées et confrontées, de manière à identifier les hypothèses et/ou facteurs d'émission les plus consensuels.

II.2 FACTEURS D'ÉMISSIONS DE LA SECTION *MATIÈRES PREMIÈRES* : CAS DU RECYCLAGE

Dans la méthode Bilan Carbone®, les bénéfices du **recyclage** sont intégrés, suivant la méthode dite des « stocks », au moment de la production d'un matériau en affectant à ce matériau un « contenu en gaz à effet de serre » qui reflète l'énergie utilisée à la production du matériau. Les impacts du recyclage étant déjà été alloué en phase de production, en fin de vie lorsque ce matériau est envoyé vers le recyclage, on considère que les impacts sont nuls (hors transports jusqu'au site de traitement)

Selon le contenu recyclé d'un matériau, le facteur d'émission de production de celui-ci résulte d'une pondération entre un facteur d'émission d'un matériau 100% vierge et d'un matériau 100% recyclé.

$$\text{Kg équivalent carbone par tonne de matière première} = C_{mv} \times X\% + C_{mr} \times (1-X\%)$$

Où :

C_{mv} représente la quantité de carbone émis pour produire 1 tonne de matière première 100% vierge

C_{mr} représente la quantité de carbone émis pour produire 1 tonne de matière première 100% recyclé

$X\%$ représente la part de matériau vierge (en masse) dans le produit fini

L'analyse des facteurs d'émission relatifs au traitement des déchets de la section matière première du Bilan Carbone® est donc liée à l'analyse de ces deux facteurs relatifs à la production de matière première primaire et secondaire.

Les facteurs répertoriés dans la section « matières premières » du guide relatif au recyclage sont les suivants:

- Acier et métaux ferreux
- Aluminium
- Plastiques (PVC, LDPE, HDPE, PET)
- Verre

Les facteurs utilisés actuellement dans la méthode Bilan Carbone® ainsi que les sources de données utilisées pour produire ces facteurs sont résumés dans le Tableau 5.

Tableau 5: Facteurs d'émissions utilisés dans la méthode du Bilan Carbone® et sources de données identifiées (kg éq. C/tonne de matériau).

Matières de base proposées dans le Bilan Carbone®	Facteur d'émission proposé dans le Bilan Carbone®	Sources répertoriées dans le guide des facteurs d'émissions
Acier ou fer blanc neuf (produits plat)	870	Office Fédéral de l'Environnement et des Paysages / 1998 / Cahiers de l'Environnement, N° 250-I / Déchets, inventaires écologiques relatifs aux emballages, volume I.
Acier ou fer blanc recyclé 100%	300	Office Fédéral de l'Environnement et des Paysages / 1998 / Cahiers de l'Environnement, N° 250-I / Déchets, inventaires écologiques relatifs aux emballages, volume I.
Aluminium neuf	2890	Office Fédéral de l'Environnement et des Paysages / 1998 / Cahiers de l'Environnement, N° 250-I / Déchets, inventaires écologiques relatifs aux emballages, volume I.
Aluminium recyclé 100%	670	Office Fédéral de l'Environnement et des Paysages / 1998 / Cahiers de l'Environnement, N° 250-I / Déchets, inventaires écologiques relatifs aux emballages, volume I.
Polyéthylène haute densité neuf	500	APME –1999, Dr. I. Boustead / 1999 / Eco-profiles in the european industry. (Année de référence des données 1995)
Polyéthylène haute densité recyclé 1	250	US Environment Protection Agency / 1998 / Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste.
Polyéthylène basse densité neuf	550	APME –1999, Dr. I. Boustead / 1999 / Eco-profiles in the european industry. (Année de référence des données 1995)
Polyéthylène basse densité recyclé 1	230	US Environment Protection Agency / 1998 / Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste.
PET neuf	1200	APME –1999, Dr. I. Boustead / 1999 / Eco-profiles in the european industry. (Année de référence des données 1995)
PET recyclé 100%	400	US Environment Protection Agency / 1998 / Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste.
PVC neuf	520	APME, 1998, Dr. I. Boustead / Mai 1998 / Eco-profiles in the european industry - report 6 : Polyvinyl Chloride (seconde édition),
PVC recyclé 100%	110	
Verre plat	414	Mission Interministérielle de l'Effet de Serre / juin 1999 / Mémento des décideurs.
Verre bouteille	120	US Environment Protection Agency / 1998 / Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste.
Verre flacons	400	
Verre recyclé 100%	165	Office Fédéral de l'Environnement et des Paysages / 1998 / Cahiers de l'Environnement, N° 250-I / Déchets, inventaires écologiques relatifs aux emballages, volume I.

Cette méthode de comptabilisation des impacts soulève plusieurs points:

- La méthode des stocks ne peut s'appliquer que dans le cas des processus de recyclage dits en « **boucle fermée** », qui désignent des cas de figure où le déchet recyclé sert pour produire exactement le même matériau. Cette méthode présente l'avantage de se baser sur une approche statistique, l'évaluation des bénéfices du recyclage ne nécessitant que de connaître le contenu recyclé moyen d'un produit.
- **Les taux de perte lors de la récupération et lors du recyclage des matériaux ne sont pas pris en compte dans la pondération.** Ainsi, pour produire 1 tonne de matière recyclée, il faudra souvent consommer plus d'une tonne de cette matière. Ces pertes peuvent être très importantes, près de 40% pour le papier de bureau ou plus de 20% pour les polyéthylènes haute et basse densité, selon l'étude USEPA06¹.

¹ USEPA (2006) Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, 3rd Edition

Tableau 6: Pourcentage de perte lors de la récupération et du recyclage de certains matériaux, USEPA¹

Loss Rates For Recovered Materials				
(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Material	Percent of Recovered Materials Retained in the Recovery Stage	Tons of Product Made per Ton of Recycled Inputs In the Manufacturing Stage	(d = b × c) Tons of Product Made Per Ton Recovered Materials	Data Source ^a
Aluminum Cans	100	0.93	0.93	FAL & ORD
Steel Cans	100	0.98	0.98	FAL
Copper Wire	82	0.99	0.81	FAL
Glass	90	0.98	0.88	FAL & ORD
HDPE	90	0.86	0.78	FAL & ORD
LDPE	90	0.86	0.78	FAL & ORD
PET	90	0.86	0.78	FAL & ORD
Corrugated Cardboard	100	0.93	0.93	FAL & ORD
Magazines/Third-class Mail	95	0.71	0.67	FAL & ORD
Newspaper	95	0.94	0.90	FAL & ORD
Office Paper	91	0.66	0.60	FAL & ORD
Phonebooks	95	0.71	0.68	FAL & ORD
Textbooks	95	0.69	0.66	FAL & ORD
Dimensional Lumber	88	0.91	0.80	FAL
Medium-density Fiberboard	88	0.91	0.80	FAL
Tires ^b	90	0.86	0.78	NA

^a FAL provided data for column (b), while ORD provided data for column (c).

^b HDPE used as a proxy.

Explanatory notes: The value in column "b" accounts for losses such as recovered newspapers that were unsuitable for recycling because they were too wet. Column "c" reflects process waste losses at the manufacturing plant or mill. Column "d" is the product of the values in Columns "b" and "c."

- **Cette méthodologie n'est pas adaptée pour réaliser le Bilan Carbone® du recyclage en boucle ouverte** qui consiste à réutiliser le matériau recyclé à la place d'un autre matériau. Par exemple, il est possible d'utiliser du plastique recyclé pour produire des palissades qui seraient normalement réalisées en bois, et il conviendrait alors de quantifier les bénéfices éventuels de cette substitution. Le recyclage en boucle ouverte est fréquent quand les propriétés du matériau recyclé sont trop différentes de celle du matériau vierge. Ces différences de propriétés font qu'il n'est alors pas possible de donner au matériau recyclé une deuxième vie identique à la précédente. L'absence de tels facteurs rend également délicate l'application de la méthode Bilan Carbone® actuelle à une entreprise qui recyclerait des déchets en boucle ouverte. L'intégration de facteurs d'émissions qui couvriraient le recyclage en boucle ouverte serait un axe d'amélioration notable de la méthode Bilan Carbone® qui dépasse néanmoins le cadre de cette étude compte tenu de la diversité des process envisageables. Ces problématiques sont discutées en annexe.

Ces considérations méthodologiques et plus généralement, les axes d'amélioration envisageables pour permettre l'appropriation de la méthode Bilan Carbone® aux métiers du secteur des déchets seront présentés plus en détails dans la troisième phase de l'étude. La méthode actuelle étant **adaptée pour les autres activités, le parti a été pris d'effectuer l'analyse et l'actualisation des facteurs actuels pour le recyclage en conservant la méthode actuelle.**

¹ USEPA 2006, Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, 3rd Edition

II.2.1 ACIER ET METAUX FERREUX

II.2.1.1 FILIERES DE PRODUCTION

Le procédé par four électrique à arc (EAF) et celui par convertisseur à oxygène (BOF) sont les deux principaux procédés utilisés dans la production d'acier et de métaux ferreux

- Le premier est surtout utilisé pour produire de l'acier à partir de matériaux recyclés, qui sont dans le cas de l'acier des ferrailles. Dans ce cas, les émissions de GES sont principalement dues aux consommations d'électricité.
- Le second est plus utilisé pour produire de l'acier à partir de matière vierge. Dans ce cas, les émissions de gaz à effet de serre proviennent en grande partie du processus de réduction du minerai de fer par du carbone.

Facteurs clés influençant les émissions:

- Consommation d'électricité pour la production d'acier secondaire.
- Processus de réduction du minerai de fer

II.2.1.2 ANALYSE DES FACTEURS D'EMISSIONS DU BILAN CARBONE®

- **Hypothèses et valeurs utilisées dans le Bilan Carbone®**

La source utilisée est la suivante :

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

Les valeurs retenues pour la méthode Bilan Carbone® sont:

- **870 kg éq C** pour une tonne d'acier primaire
- **300 kg éq C** pour une tonne d'acier secondaire, c'est-à-dire entièrement produite à partir de ferrailles.

Les données se réfèrent au contexte allemand et ont été collectées entre 1993 et 1995.

- **Analyse de la source**

Dans les cas de la production d'acier et de métaux ferreux par le procédé EAF, l'électricité est la principale source de gaz à effet de serre. Le facteur d'émission est alors très dépendant des émissions de gaz à effet de serre liées à la production d'électricité et donc du contexte géographique car les sources d'énergies utilisées pour la production d'électricité peuvent varier fortement d'un pays à l'autre.

Tableau 7: Emissions de gaz à effet de serre par kWh produit selon le pays de production. (Source Bilan Carbone®)

Pays	Kg équivalent carbone par kWh, en 2004
Electricité en France	0,023
Electricité en Allemagne	0,141
Electricité en Autriche	0,058
Electricité en Belgique	0,073
Electricité au Danemark	0,091
Electricité en Espagne	0,117
Electricité en Finlande	0,068
Electricité en Grèce	0,222
Electricité en Irlande	0,178
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	0,098
Electricité aux USA	0,158
Electricité au Japon	0,116

Ainsi, il y aura une différence importante entre les émissions de gaz à effet de serre dues à la production d'acier secondaire en Allemagne et en France. Pour adapter le facteur à l'acier consommé en France, il est alors nécessaire de connaître l'origine de l'acier utilisé en France.

Selon la Fédération Française de l'Acier, seulement 20 kilotonnes sur les 2705 kilotonnes d'acier importés en France proviennent de pays hors Europe des 27. En première approximation, l'acier consommé en France est donc produit en Europe. Toutefois, ces informations sont insuffisantes pour déterminer quel mix énergétique ou quel facteur d'émission il faut prendre pour l'électricité servant à la production de l'acier.

Les facteurs d'émission retenus dans la méthode Bilan Carbone® sont cependant cohérents avec d'autres jeux de données issues d'études américaines et françaises. Ces valeurs sont fournies dans le guide des facteurs d'émission de la méthode Bilan Carbone®. Ainsi dans l'étude USEPA98¹ les émissions de gaz à effet de serre induites par la production de canette en fer blanc sont de 871 kg éq. C/tonne de canette en fer blanc primaire et de 309 kg éq C/tonne de canette en fer blanc secondaire.

II.2.1.3 ACTUALISATION

- **Bibliographie clé:**

- **ADEME06** ADEME (2006) Bilan du recyclage 1996-2005 Partie 2 Données détaillées par filière Rapport final, Décembre 2006
- **AEA01** AEA Technology (2001): Waste Management Options and Climate Change. Final report to the European Commission, DG Environment.
- **MIES03** Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (2003) Mémento des décideurs.
- **MIES99** Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (juin 1999) Mémento des décideurs.
- **OFEFP** Office Fédéral de l'Environnement et des Paysages (1998) Cahiers de l'Environnement, N° 050

¹ USEPA (1998) Greenhouse Gas Emissions From Management Of Selected Materials In Municipal Waste, p. 24.

- **USEPA98** USEPA (1998) Greenhouse Gas Emissions From Management Of Selected Materials In Municipal Waste
- **USEPA02** USEPA (2002) Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, 2nd Edition
- **USEPA06** USEPA (2006) Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, 3rd Edition, Chapter 3, Source Reduction and Recycling
- **WISARD97** Résultats issus du module Recyclage de l'acier issu des centres de tri en acier secondaire du logiciel Wisard

• **Valeurs issues des études**

Les facteurs d'émissions recensés dans la littérature sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 8: Facteurs d'émission liés à la production d'acier et de métaux ferreux.

Sources	Acier ou fer blanc 100% vierge	Acier ou fer blanc 100% recyclé
	kg éq. C par tonne	
Bilan Carbone ®	870	300
USEPA98	1135	573
USEPA02	1113	562
USEPA06	1113	562
OFEFP98	884	331
AEAT01	810	316
MIES99	436	173
MIES03	436	173
Wisard97	518	46

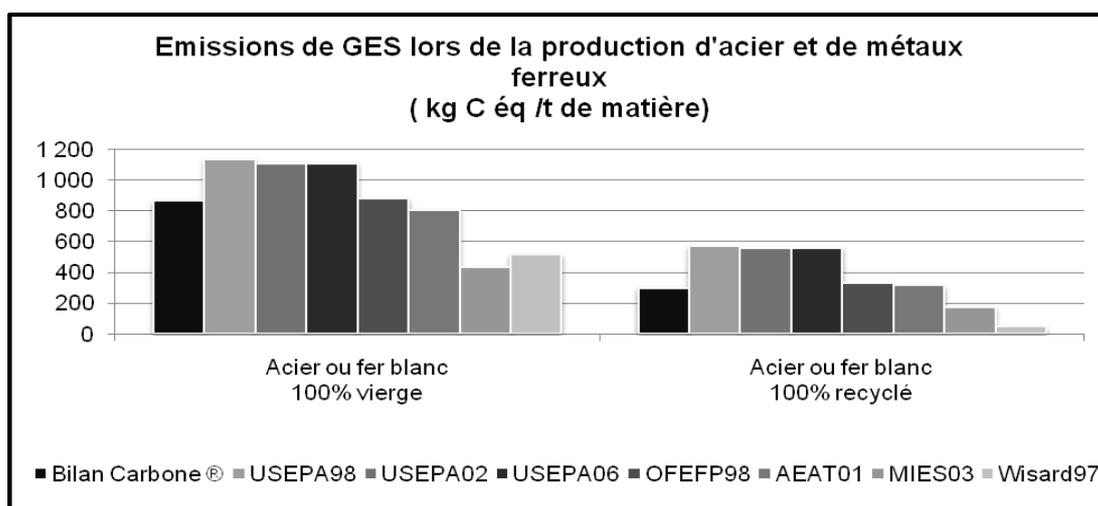


Figure 1: Facteurs d'émission liés à la production d'acier et de métaux ferreux.

Les valeurs d'émissions de GES sont cohérentes entre elles pour la plupart des sources de données.

• **Analyse des valeurs proposées dans les études**

A l'exception des valeurs issues de WISARD et du MIES, les facteurs d'émissions sont compris

- entre 810 à 1135 kg éq. C/t d'acier primaire.
- entre 300 à 573 kg éq. C/t d'acier secondaire.

Les sources primaires des facteurs proposés par le MIES n'ont pas pu être retracées. Cependant, étant donné que certains facteurs du MIES ont été sélectionnés par la méthode Bilan Carbone® pour quantifier les émissions d'autres fractions (verre notamment), la source du MIES a été retenue afin de confronter ce jeu de données aux autres valeurs de la littérature.

La différence entre la valeur fournie par le logiciel Wisard et les autres valeurs n'a pas pu être analysée par manque de transparence du logiciel sur le recyclage de l'acier.

L'analyse de l'évolution des facteurs d'émissions dans les publications de l'USEPA montre de faibles différences entre les valeurs de 1998 et celle de 2006 au niveau des émissions relatives à la production d'acier primaire et secondaire

Tableau 9: Evolution des facteurs d'émissions publiés par l'USEPA

		Bilan Carbone®	USEPA98	USEPA02	USEPA06
Acier ou fer blanc 100% vierge	kg éq. C par tonne	870	1135	1113	1113
Acier ou fer blanc 100% recyclé	kg éq. C par tonne	300	573	562	562

- **Valeurs recommandées**

Compte tenu de la bonne cohérence entre les sources de la littérature, il est préconisé de garder les mêmes facteurs pour la production d'acier et de métaux ferreux.

Tableau 10: Facteurs d'émission de la méthode Bilan Carbone®, et facteurs d'émissions proposés pour l'actualisation (et incertitude estimée)

kg éq C par tonne	Bilan Carbone® actuel	Valeurs proposées	Sources
Acier ou fer blanc 100% vierge	870	880 ¹ (30%)	OFEFP
Acier ou fer blanc 100% recyclé	300	330 ² (40%)	OFEFP
Acier ou fer blanc (valeur moyenne)		660	

Selon ADEME06, le taux d'incorporation moyenne d'acier et de métaux ferreux est d'environ **40%** pour la France en 2005, soit un facteur d'émission de 660 kg éq C/t. Cette valeur peut être utilisée quand aucune donnée sur le taux d'incorporation de matière recyclée n'est fournie.

¹ Recalculé avec les facteurs d'émissions proposés par le dernier rapport du GIEC.

² Recalculé à partir des données OFEFP et des PRG actualisés

II.2.2 ALUMINIUM

II.2.2.1 PROCEDES DE PRODUCTION

La principale source d'émissions lors de la production d'aluminium primaire est la consommation d'électricité lors de l'électrolyse de l'aluminium. Les émissions de GES lors de la production d'aluminium sont fortement liées aux consommations d'électricité, le contexte géographique a donc une forte importance. Le facteur d'émission utilisé pour la production d'aluminium vierge aura donc une importante variabilité qui pourrait être réduite en proposant plusieurs facteurs selon l'origine géographique.

De plus, contrairement aux autres matériaux de base, la production d'aluminium émet aussi des perfluorocarbures (PFC) tels que le CF_4 et le C_2F_6 qui sont des gaz à fort Pouvoir de Réchauffement Global. Ces émissions sont dues à des surtensions au niveau de l'anode lors de l'électrolyse de l'aluminium et sont actuellement inévitables.

Facteurs clés influençant les émissions:

- Consommation d'électricité pour la production d'aluminium primaire.
- Emissions de perfluorocarbures lors de la production d'aluminium primaire.

II.2.2.2 ANALYSE DES FACTEURS D'EMISSIONS DU BILAN CARBONE®

- **Hypothèses et valeurs utilisées dans le Bilan Carbone®**

La source utilisée est identique à celle utilisée pour l'acier et les métaux ferreux :

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

Les valeurs retenues sont les suivantes :

- **2980 kg éq C** pour une tonne d'aluminium primaire
- **670 kg éq C** pour une tonne d'aluminium secondaire.

- **Analyse de la source**

Les émissions de gaz à effet de serre lors de la production de l'aluminium primaire sont fortement liées à la production d'électricité. Les auteurs de la publication se placent dans le contexte suisse, le facteur proposé par l'OFEFP¹ considère ainsi que 60% de l'aluminium consommé en Suisse est produit en Europe et que les 40% restant sont produit au Canada et en Islande.

Le calcul des facteurs d'émissions à partir de cette publication n'a pas permis de retrouver le facteur proposé dans la méthode Bilan Carbone® pour la production d'aluminium secondaire. En effet, les valeurs d'émission données dans la publication sont les suivantes:

Tableau 11: Emissions de gaz à effet de serre lors de la production d'aluminium à partir de matériau recyclé (kg/t), OFEFP p.81

	Procédé	Energie thermique	Energie Electrique	Transports	Autres	Total
CO₂ (kg)	0	27	130	0	246	403
N₂O (kg)		3.9E-04	1.2E-03		3.0E-04	1.9E-03
CH₄ (kg)		0.54	0.31			0.85

¹ Office Fédéral de l'Environnement et des Paysages (1998) Cahiers de l'Environnement, N° 250-I / Déchets, inventaires écologiques relatifs aux emballages, volume I, p. 75-81.

D'où en convertissant les émissions de CO₂, de N₂O et de CH₄ en équivalent carbone :

Tableau 12: Emissions de gaz à effet de serre (kg éq. C/t d'aluminium secondaire produit) lors de la production d'aluminium à partir de matériau recyclé agrégées en équivalent carbone (kg éq C/t), Calcul BIO Intelligence Service d'après OFEFP.

Gaz	Emissions en kg éq C/t
CO ₂	110
N ₂ O	0
CH ₄	6
Total	116

Le facteur d'émission pour la production d'aluminium secondaire est donc égal à **116 kg éq C/t d'aluminium** au lieu de **670 kg éq C/t d'aluminium secondaire**.

II.2.2.3 ACTUALISATION

- **Bibliographie clé:**

- **ADEME06** ADEME (2006) Bilan du recyclage 1996-2005 Partie 2 Données détaillées par filière Rapport final, Décembre 2006
- **AEA01** AEA Technology (2001): Waste Management Options and Climate Change. Final report to the European Commission, DG Environment.
- **EAA08** European Aluminium Association (2008) Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry
- **IAI07** International Aluminium Institut (2007) Life Cycle Assessment Of Aluminium: Inventory Data For The Primary Industry, Septembre 2007
- **MIES03** Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (2003) Mémento des décideurs.
- **MIES99** Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (juin 1999) Mémento des décideurs.
- **OFEFP** Office Fédéral de l'Environnement et des Paysages (1998) Cahiers de l'Environnement, N° 250-I / Déchets, inventaires écologiques relatifs aux emballages, volume I.
- **USEPA98** USEPA (1998) Greenhouse Gas Emissions From Management Of Selected Materials In Municipal Waste
- **USEPA02** USEPA (2002) Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, 2nd Edition
- **USEPA06** USEPA (2006) Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, 3rd Edition, Chapter 3, Source Reduction and Recycling
- **WISARD97** Résultats issus du module "Recyclage des emballages aluminium issus des collectes sélectives multi-matériaux en aluminium secondaire (procédé actuel)" du logiciel Wisard

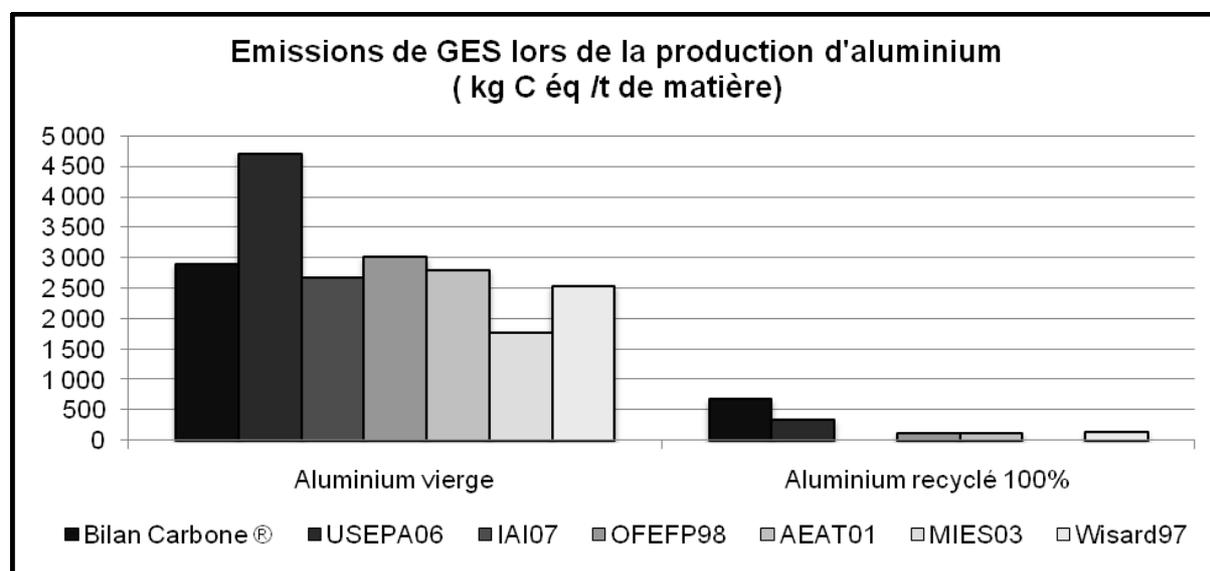
- **Valeurs issues des études**

Les facteurs d'émissions recensés dans la littérature sont présentés dans le tableau suivant

Tableau 13: Facteurs d'émission liés à la production d'aluminium (kg éq. C par tonne).

		Bilan Carbone ®	USEP A06	IAI07	EAA08	OFEFP 98	AEA01	MIES 03	Wisard97
Aluminium 100% vierge	kg éq. C par tonne	2890	4696	2676	2639	3006	2793	1767	2536
Aluminium 100% recyclé	kg éq. C par tonne	670	331		138	116	110		134

Figure 2: Facteurs d'émission de gaz à effet de serre pour la production d'aluminium primaire et secondaire.



- **Analyse des valeurs proposées dans les études**

Les facteurs d'émission publiés par les différentes sources analysées sont pour la grande majorité compris :

- entre 2500 et 2900 kg éq. C/t d'aluminium pour la production d'aluminium à partir de matière vierge (sauf pour l'USEPA06 et le MIES)
- entre 110 et 140 kg éq. C/t d'aluminium pour la production d'aluminium à partir de matière recyclée (sauf pour USEPA06).

Pour l'aluminium primaire, seules les valeurs de la MIES et de l'USEPA en 2006 sortent de la fourchette donnée ci-dessus.

- Pour l'USEPA06, la valeur d'émission comprend aussi la production de la canette. Or l'énergie utilisée pour la production de la canette à partir de lingot d'aluminium représente 14% de l'énergie totale nécessaire à la production de la canette. De plus, les émissions de gaz à effet de serre lors de la production d'aluminium primaire sont fortement liées à la consommation d'électricité, or les émissions de gaz à effet de serre de la production d'électricité sont plus importantes en Amérique du Nord qu'en Europe.

- Comme pour la production d'acier, le facteur publié par la MIES n'a pas pu être analysé.

Pour la production d'aluminium secondaire, la valeur publiée par l'USEPA est la seule supérieure à 140 k éq. C /t d'aluminium. Toutefois cette valeur inclut la production de la canette en aluminium recyclé.

- **Valeurs recommandées**

Parmi les facteurs compris dans les fourchettes précitées, deux facteurs sont issus d'études menées par des associations de producteurs d'aluminium, l'*International Aluminium Institut* et l'*European Aluminium Association*, qui ont publié des profils environnementaux, respectivement pour la production d'aluminium primaire et la production d'aluminium secondaire. Ces valeurs font référence en Europe et sont donc recommandées pour le Bilan Carbone®.

Tableau 14: Facteurs d'émission de la méthode Bilan Carbone® et facteurs d'émissions proposés pour l'actualisation (kg éq C/t) (et incertitude estimée)

Matériaux	Bilan Carbone® actuel	Valeurs proposées	Sources
Aluminium 100% vierge	2890	2680 (10%)	IAI07
Aluminium 100% recyclé	670	140 (20%)	EAA08
Aluminium (valeur moyenne)	-	1664	

Selon ADEME06, le taux d'incorporation moyen d'aluminium recyclé est d'environ **39%** pour la France en 2005, soit 1664 kg éq C /t. Cette valeur peut être utilisée quand aucune donnée sur le taux d'incorporation de matière recyclée n'est fournie.

II.2.3 PLASTIQUES

II.2.3.1 PROCÉDES DE PRODUCTION

Pour chaque matériau plastique, plusieurs routes de productions existent. Par exemple, le Polyéthylène Téréphtalate est produit, soit grâce à un processus dit « TPA » qui passe par la production d'acide téréphtalique (TPA), soit par le procédé dit « DMT » qui passe par une étape de production de diméthyle téréphtalate (DMT). Les émissions liées à la production des plastiques à partir de matériaux bruts sont essentiellement dues aux consommations énergétiques et à l'extraction des matières premières.

Tableau 15: Emissions de gaz à effet de serre lors de la production de PET amorphe.

Valeur actualisée	Production de l'énergie	Utilisation de l'énergie	Transport	Process	Biomasse	Emissions fugitives	Total pour 1 tonne
CO ₂ (kg)	971	1694	7.5	137	-9.4E-03	0.0E+00	2809
N ₂ O (kg)	1.1E-09	6.0E-14	6.6E-12	4.4E-08	0.0E+00	0.0E+00	4.5E-08
CH ₄ (kg)	15	0.63	8.8E-06	2.5	0.0E+00	1.1E-06	18

Il existe trois techniques de recyclage des plastiques : les procédés mécaniques, les procédés chimiques et les procédés dits de régénération ("feedstock recycling").

Les techniques de régénération réduisent les plastiques et permettent de créer une pâte utilisée ensuite comme source d'énergie. Ce processus n'est donc pas un procédé de recyclage en boucle fermée et ne peut pas être intégré dans le guide avec la méthode des stocks utilisée actuellement dans la méthode Bilan Carbone®.

Le procédé de recyclage mécanique est composé de trois processus séquentiels. Les plastiques sont tout d'abord triés, puis lavés et enfin broyés en granulés ou en pastilles pour être ensuite utilisés comme matière première dans la production de matériel en plastique. La présence de contaminants dans les granulés ou les pastilles peut engendrer d'importantes pertes de propriétés mécaniques.

telles que la diminution de la résistance des objets produits. Un tri poussé et un nettoyage efficace sont donc des prérequis pour optimiser les conditions de recyclage des plastiques.

Le recyclage chimique consiste à décomposer les macromolécules constitutives des polymères sous l'effet de la chaleur afin d'obtenir le monomère de départ.

II.2.3.2 ANALYSE DES FACTEURS D'ÉMISSIONS DU BILAN CARBONE®

- **Hypothèses et valeurs utilisées dans le Bilan Carbone®**

Les sources utilisées dans la méthode Bilan Carbone® sont les suivantes :

- APME (1997-1999) Inventaires de cycles de vie des plastiques publiés par l'APME, pour les matériaux vierges.
- USEPA (1998) Greenhouse Gas Emissions From Management Of Selected Materials In Municipal Waste, pour les matériaux recyclés.

Le tableau suivant rappelle les facteurs retenus par la méthode :

Tableau 16: Facteurs d'émissions de GES du Bilan Carbone® pour la production des plastiques primaires et secondaires

	Polyéthylène Haute densité (PEHD)	Polyéthylène Basse densité (PEBD)	Polyéthylène Téréphtalate (PET)	Polychlorure de Vinyle (PVC)	Sources
Matériau vierge (source primaire)	500 kg éq C	550 kg éq C	1200 kg éq C	520 kg éq C	APME
Matériau recyclé (source secondaire)	250 kg éq C	230 kg éq C	400 kg éq C	110 kg éq C	USEPA98 (sauf pour le PVC)

Ces valeurs sont toutes issues des mêmes sources de données. Ainsi les facteurs d'émissions utilisés pour la production de plastiques primaires sont issus des inventaires de cycle de vie de l'APME (aujourd'hui PlasticsEurope) et ceux relatifs à la production de plastiques secondaires proviennent d'une publication de l'agence de l'environnement américaine, l'USEPA¹. Toutefois, le facteur proposé dans la méthode pour la production de PVC à partir de matériaux recyclés n'est pas explicité dans le guide et la source n'est pas mentionnée.

- **Analyse de la source pour la matière vierge (APME)**

Les inventaires de production de plastiques primaires ont été réalisés par l'APME entre 1997 et 1999. Ces inventaires ne sont plus disponibles, seules les dernières versions sont encore publiées par cette association (devenue PlasticsEurope). Il a cependant été possible d'analyser le facteur d'émission relatif au PVC.

Les résultats proposés dans le guide des facteurs d'émissions sont ceux que l'on peut retrouver dans l'éco-profil du PVC publié par l'APME en 1998. Cependant, il s'avère que le type de PVC choisi pour calculer le facteur est le "bulk PVC" qui est produit à partir d'une polymérisation en masse ("bulk polymerization"). Or selon l'éco-profil de l'APME, le "bulk PVC" ne représentait à l'époque que 5% du marché du PVC. Par contre, le "suspension PVC" représentait 80 % du marché et était donc plus représentatif des consommations françaises surtout pour les matériaux de construction.

En effet, les différentes formes de PVC n'ont pas les mêmes utilisations et les émissions de gaz à effet de serre sont assez différentes pour chaque processus de polymérisation. Il serait donc souhaitable de proposer plusieurs facteurs d'émissions pour les différentes utilisations.

¹ USEPA (1998) Greenhouse Gas Emissions From Management Of Selected Materials In Municipal Waste

Tableau 17: Types de PVC et leurs utilisations

Formes de PVC	Utilisation
Suspension PVC	tuyaux, matériaux de construction, isolation de câble et autres produits produits par injection
Emulsion PVC	enduction
Bulk PVC	feuille de PCV et bouteilles

Tableau 18: Emissions de gaz à effet de serre pour les différents types de PVC, calcul BIO Intelligence Service suivant l'inventaire de l'APME pour le PVC¹

	Emission de gaz à effet de serre (kg équ. C/t)
Suspension PVC	589
Emulsion PVC	745
Bulk PVC	527

- **Analyse de la source pour la matière recyclée (USEPA98)**

Le calcul des facteurs de production de plastiques secondaires a permis d'identifier quelques erreurs. En effet, les valeurs proposées par l'USEPA sont exprimées dans la publication en tonne de carbone équivalent par « short ton » de matériaux. La conversion de « short ton » en tonnes métriques n'a pas été effectuée (1 tonne métrique=0.9072 « short tons »). Les facteurs sont donc sous-évalués d'environ 10%.

Tableau 19: Facteurs d'émissions pour la production de matériaux plastiques à partir de matière première primaire et secondaire. (Source USEPA98, p. 34 et calcul BIO Intelligence Service pour la conversion de short tonne en tonne métrique)

Plastiques	Bilan Carbone ® (kg équ. C / t de plastique)	USEPA98 (kg équ. C / <u>short</u> t de plastique)	USEPA98 (kg C équ. / t de plastique)
Polyéthylène haute densité recyclé 100%	250	250	276
Polyéthylène basse densité recyclé 100%	230	230	254
PET recyclé 100%	400	400	441

Il convient de noter que certaines des données de base utilisées par l'EPA pour produire ces valeurs dataient déjà de 20 ans lors de la publication, soit 30 ans aujourd'hui. Nous pouvons donc nous interroger sur la représentativité technologique de ces facteurs.

¹Eco-profiles of the European Plastics Industry, POLYVINYLCHLORIDE (PVC), The European Council of Vinyl Manufacturers (ECVM) & PlasticsEurope, May1998

Tableau 20: Extrait du document réalisé pour l'étude USEPA98 *Background Document D Greenhouse Gas Emissions From Management Of Selected Materials In The Municipal Solid Wastestream Comment-Response Document, p. D-24*

Exhibit 2-2 shows data from Franklin and Tellus, with an average percent difference between the two data sets of about 15 percent. However, there are significant differences for some materials, especially plastics, where there is nearly a factor of two. Simply averaging the two data sets and using a single number is not justified. (American Plastics Council, Washington, D.C.)

Franklin Associates Ltd., and the Tellus Institute obtained the data used in this report. The data come from several sources, including sources within the industries that manufacture the materials analyzed. While we acknowledge that some of the data represent practices as much as 20 years old, we do not have better data. We did not receive any newer data during the public comment period, despite a specific request to that effect. Under the circumstances, the data we are using are the best available. Given that the report is intended as a tool for estimating greenhouse gas emissions within a voluntary reporting program, we believe that averaging the two data sets is a reasonable approach. Unfortunately, we were not provided with any superior data as a result of the public comment process, therefore, we used the data from the draft report.

II.2.3.3 ACTUALISATION : POLYETHYLENE HAUTE DENSITE (PEHD)

- **Bibliographie clé:**

- **AEA01** AEA Technology (2001): Waste Management Options and Climate Change. Final report to the European Commission, DG Environment.
- **PlasticsEurope** The European Council of Vinyl Manufacturers (ECVM) & PlasticsEurope (2005) Eco-profiles of the European Plastics Industry, HIGH DENSITY POLYETHYLENE(HDPE)
- **USEPA98** USEPA (1998) Greenhouse Gas Emissions From Management Of Selected Materials In Municipal Waste
- **USEPA02** USEPA (2002) Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, 2nd Edition
- **USEPA06** USEPA (2006) Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, 3rd Edition, Chapter 3, Source Reduction and Recycling
- **WISARD97** Résultats issus du module "Recyclage des corps creux en PEhd en flacons tri-couches à partir de paillettes ou à partir de granules" du logiciel Wisard

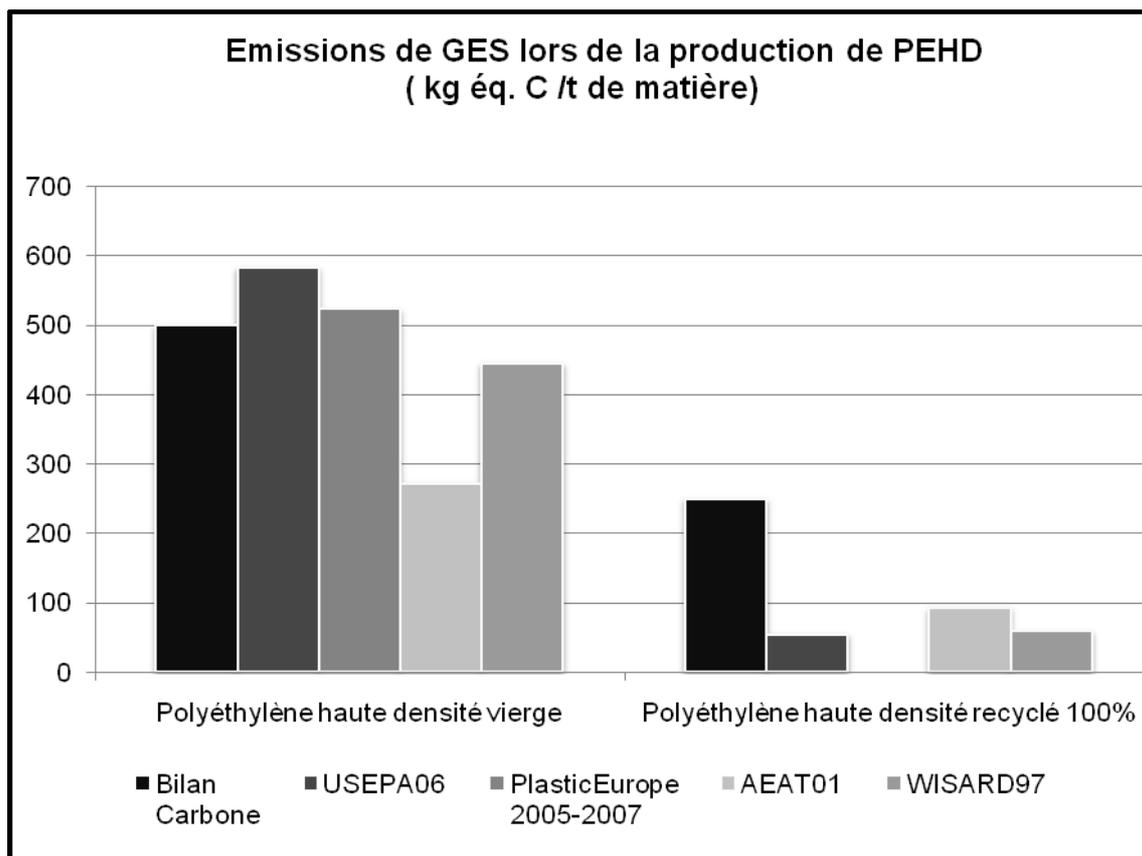
- **Valeurs issues des études**

Les facteurs d'émissions recensés dans la littérature sont présentés dans le tableau suivant

Tableau 21: Facteurs d'émission de gaz à effet de serre pour la production de polyéthylène haute densité primaire et secondaire (kg éq C/t)

Matériaux	Bilan Carbone®	USEPA06	PlasticEurope 2005-2007	AEA01	WISARD 97
Polyéthylène haute densité vierge	500	584	524	273	446
Polyéthylène haute densité recyclé 100%	250	55		93	60

Figure 3: Facteurs d'émission de gaz à effet de serre pour la production de polyéthylène haute densité primaire et secondaire.



• **Analyse des valeurs proposées dans les études**

Les facteurs d'émission de gaz à effet de serre proposés dans les différentes publications analysées sont compris :

- entre 450 et 580 kg éq. C/t de PEHD (sauf celui issu de l'étude AEA) pour la production de PEHD primaire
- entre 55 et 95 kg éq. C/t de PEHD pour la production de PEHD secondaire.

Le facteur proposé dans la publication AEA01 pour la production de PEHD primaire est issu d'une publication qu'il n'a pas été possible de retrouver¹. La différence entre la valeur issue de cette étude et

¹ Chem Systems, 1997, "Life cycle inventory development for recycling", environment agency project record, Environment Agency, UK.

les autres n'a pas pu être analysée. Le facteur publié dans l'étude AEA01 pour la production de PEHD secondaire découle de la même étude.

La valeur retenue par l'USEPA pour l'étude USEPA06 n'est pas spécifique au recyclage du PEHD, la même est utilisée pour le recyclage des autres matières plastiques. En effet, ce facteur est basé sur le recyclage mécanique des plastiques et il est supposé que l'énergie nécessaire pour la collecte, le broyage et le nettoyage des plastiques est la même pour tout les plastiques, ce qui constitue une hypothèse raisonnable compte tenu de la similarité des process. Les émissions de gaz à effet de serre liées au recyclage des plastiques ont fortement varié entre la publication de 1998 (USEPA98) et celle de 2006. Ainsi le facteur pour le recyclage du PEHD est passé de 275 kg éq. C/t à 55 kg éq. C/t. Aucune explication n'est donnée sur ce point dans les rapports de l'USEPA, toutefois, les données sur les processus de recyclage des plastiques étant déjà vieilles de 20 ans dans le rapport de 1998, il s'agit vraisemblablement d'une actualisation des valeurs.

Le processus de recyclage modélisé dans le logiciel WISARD est également de type « recyclage mécanique ». Toutefois, une étape de co-extrusion est aussi modélisée et intégré dans le résultat.

- **Valeurs recommandées**

Pour le facteur d'émission de la production de PEHD vierge, nous recommandons de retenir la valeur publiée par PlasticsEurope. En effet, les inventaires de cycle de vie de matière plastique publiés par PlasticsEurope (anciennement APME) sont les plus reconnus par la communauté scientifique. Cette valeur est par ailleurs cohérente avec les facteurs d'émissions issus des autres publications.

Pour être cohérent avec ce qui avait été fait dans la méthode Bilan Carbone® et afin de pouvoir utiliser les derniers facteurs de réchauffement du GIEC, les émissions de GES en équivalents carbone ont été directement calculées à partir des émissions de CO₂, de CH₄ et de N₂O. Les éco-profilés fournissent directement une valeur d'émissions de gaz à effet de serre pour la production d'une tonne de matériaux plastiques mais il n'est alors pas possible de modifier les PRG utilisés¹.

Tableau 22: Décomposition des émissions de gaz à effet de serre répertoriées dans l'éco-profil du PEHD, PlasticsEurope² (kg/t)

	Production de l'énergie	Utilisation de l'énergie	Transport	Process	Biomasse	Emissions fugitives	Total pour 1 tonne
CO₂ (kg)	421	951	9	186	0	0	1567
N₂O (kg)	0	0	0	0	0	0	0
CH₄ (kg)	10	0	0	4	0	0	14

Tableau 23: Emissions de gaz à effet de serre lors de la production de PEHD, BIO Intelligence Service/PlasticsEurope (kg éq. C/t)

	Emissions en équivalent carbone	
	Avec les facteurs de PlasticsEurope	Avec les facteurs de l'IPCC2007
CO₂	427	427
N₂O	0	0
CH₄	81	97
Total	509	524

Pour le facteur d'émission de la production de PEHD secondaire, nous recommandons de prendre la valeur de l'USEPA. En effet, la valeur issue de l'étude AEA n'a pas pu être analysée tandis que la

¹ Les PRG utilisés par PlasticsEurope sont ceux du troisième rapport du GIEC.

² Source: Eco-profiles of the European Plastics Industry, HIGH DENSITY POLYETHYLENE(HDPE), The European Council of Vinyl Manufacturers (ECVM) & PlasticsEurope, March 2005

valeur d'émission proposée dans le logiciel WISARD inclut une étape d'extrusion. De plus, les valeurs de WISARD et de l'USEPA sont très proches et l'on peut penser que la légère différence entre les deux valeurs est seulement due au processus d'extrusion.

Tableau 24: Facteurs d'émission de la méthode Bilan Carbone® et facteurs d'émissions proposés pour l'actualisation (kg éq C/t) (et incertitude estimée)

Matériaux	Bilan Carbone® actuel	Valeurs proposées	Source
PEHD 100% vierge	500	520 (15%)	PlasticsEurope
PEHD 100% recyclé	250	55 (20%)	USEPA06

II.2.3.4 ACTUALISATION : POLYETHYLENE BASSE DENSITE (PEBD)

- **Bibliographie clé:**

- **AEA01** AEA Technology (2001): Waste Management Options and Climate Change. Final report to the European Commission, DG Environment.
- **PlasticsEurope** The European Council of Vinyl Manufacturers (ECVM) & PlasticsEurope (2005) Eco-profiles of the European Plastics Industry, LOW DENSITY POLYETHYLENE (LDPE)
- **USEPA98** USEPA (1998) Greenhouse Gas Emissions From Management Of Selected Materials In Municipal Waste
- **USEPA02** USEPA (2002) Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, 2nd Edition
- **USEPA06** USEPA (2006) Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, 3rd Edition, Chapter 3, Source Reduction and Recycling

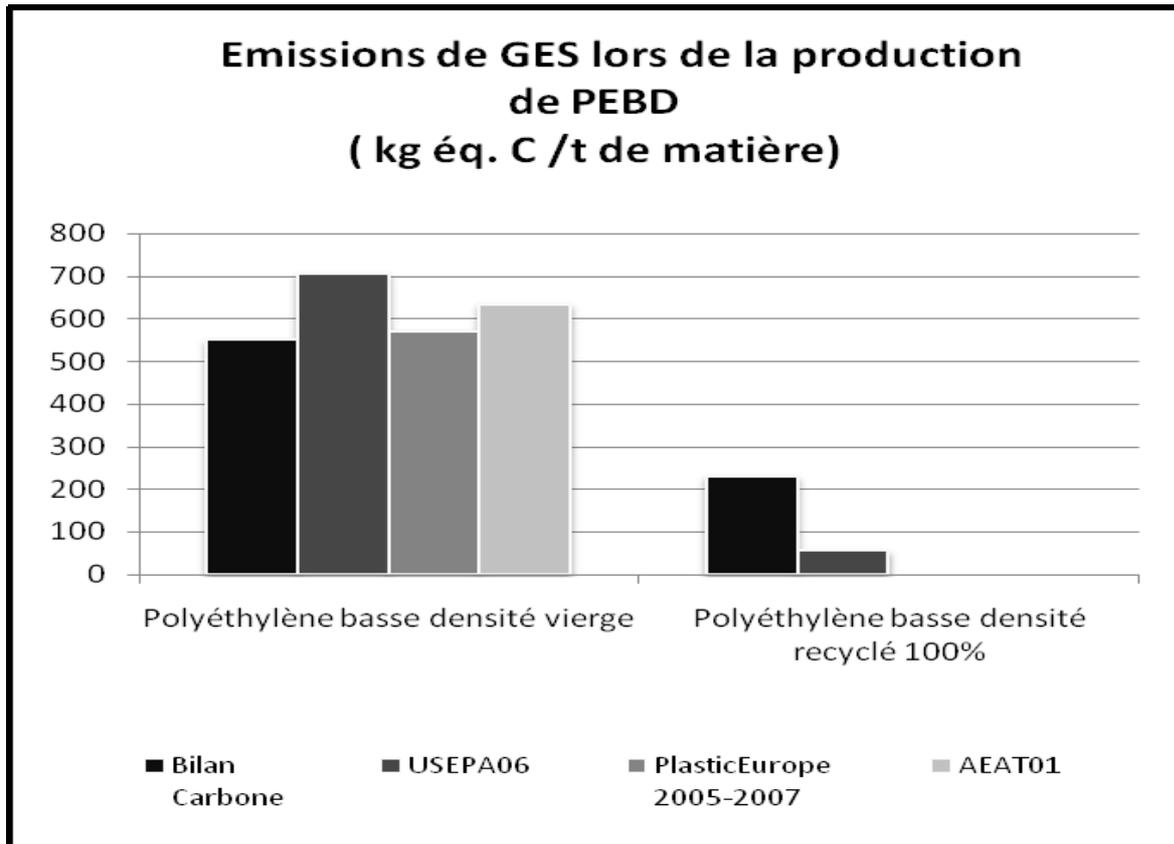
- **Valeurs issues des études**

Les facteurs d'émissions recensés dans la littérature sont présentés dans le tableau suivant

Tableau 25: Facteurs d'émission de gaz à effet de serre pour la production de polyéthylène basse densité primaire et secondaire (kg éq. C /t)

Matériaux	Bilan Carbone	USEPA06	PlasticsEurope 2005-2007	AEA01
Polyéthylène basse densité 100% vierge	550	705	571	634
Polyéthylène basse densité 100% recyclé	230	55		

Figure 4 : Facteurs d'émission de gaz à effet de serre pour la production de polyéthylène haute densité primaire et secondaire.



- **Analyse des valeurs proposées dans les études**

Les facteurs d'émission de gaz à effet de serre disponibles dans la littérature analysée sont compris :

- entre 570 et 700 kg éq. C/t de PEBD pour la production de PEBD primaire
- pour la production de PEBD secondaire, une seule valeur a été trouvée, égale à 55 kg éq C/t de PEBD.

- **Valeurs recommandées**

Comme pour le PEHD, nous recommandons de prendre la valeur publiée par PlasticsEurope pour le facteur d'émission de la production de PEBD primaire. Le détail des émissions retenues et des valeurs obtenues est récapitulé dans les tableaux suivants.

Tableau 26: Emissions de gaz à effet de serre lors de la production de PEBD, PlasticsEurope¹ (kg/t)

	Production de l'énergie	Utilisation de l'énergie	Transport	Process	Biomasse	Emissions fugitives	Total pour 1 tonne
CO ₂ (kg)	578	963	7	140	0	0	1687
N ₂ O (kg)	0	0	0	0	0	0	0
CH ₄ (kg)	13	0	0	4	0	0	16

¹ Source: Eco-profiles of the European Plastics Industry, LOW DENSITY POLYETHYLENE(LDPE), The European Council of Vinyl Manufacturers (ECVM) & PlasticsEurope, March 2005

Tableau 27: Emissions de gaz à effet de serre lors de la production de PEBD, BIO Intelligence Service/PlasticsEurope(kg éq. C/t)

Gaz	Emissions en équivalent carbone	
	Avec les facteurs de PlasticsEurope	Avec les facteurs de l'IPCC2007
CO ₂	460	460
N ₂ O	0	0
CH ₄	93	111
Total	554	571

Pour le facteur d'émission de la production de PEBD secondaire, la seule étude proposant un facteur est l'USEPA.

Tableau 28: Facteurs d'émission de la méthode Bilan Carbone® et facteurs d'émissions proposés pour l'actualisation (kg éq. C /t) (et incertitude estimée)

Matériaux	Bilan Carbone® actuel	Valeurs proposées	Source
PEBD 100% vierge	550	570 (20%)	PlasticsEurope
PEBD 100% recyclé	230	55 (30%)	USEPA06

II.2.3.5 ACTUALISATION : POLYETHYLENE TEREPHTALATE (PET)

- **Bibliographie clé:**

- **AEA01** AEA Technology (2001): Waste Management Options and Climate Change. Final report to the European Commission, DG Environment.
- **PlasticsEurope** The European Council of Vinyl Manufacturers (ECVM) & PlasticsEurope (2005) Eco-profiles of the European Plastics Industry, POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) (AMORPHOUS GRADE)
- **USEPA98** USEPA (1998) Greenhouse Gas Emissions From Management Of Selected Materials In Municipal Waste
- **USEPA02** USEPA (2002) Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, 2nd Edition
- **USEPA06** USEPA (2006) Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, 3rd Edition, Chapter 3, Source Reduction and Recycling

- **Valeurs issues des études**

Les facteurs d'émissions recensés dans la littérature sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 29: Facteurs d'émission de gaz à effet de serre pour la production de polyéthylène téréphtalate primaire et secondaire (kg éq C/t)

Matériaux	Bilan Carbone	USEPA06	PlasticsEurope 2005-2007	AEA01	WISARD97
PET vierge	1200	650	892	600	490
PET recyclé 100%	400	55		31	106

- **Analyse des valeurs proposées dans les études**

Les facteurs d'émission de gaz à effet de serre proposés dans les différentes publications analysées sont compris :

- entre 490 et 900 kg éq C/t de PET pour la production de PET primaire
- entre 31 et 111 kg éq C/t de PET pour la production de PET secondaire.

La valeur proposée par AEA pour la production de PET secondaire est calculée à partir des données d'une usine de recyclage suisse. La source des données n'est pas mentionnée et l'analyse de ce facteur n'a donc pas pu être réalisée.

Dans WISARD, le recyclage du PET est modélisé par un processus de recyclage chimique. Ce premier procédé permet de produire de la résine Supercycle® qui se substitue à du PET vierge.

- **Valeurs recommandées**

Comme pour le PEHD, nous recommandons de prendre la valeur publiée par PlasticsEurope pour le facteur d'émission de la production de PET primaire. Le détail des émissions retenues et des valeurs obtenues est récapitulé dans les tableaux suivants.

Tableau 30: Emissions de gaz à effet de serre lors de la production de PET amorphe (kg/t), PlasticsEurope¹

	Production de l'énergie	Utilisation de l'énergie	Transport	Process	Biomasse	Emissions fugitives	Total pour 1 tonne
CO ₂ (kg)	971	1694	7	137	0	0	2809
N ₂ O (kg)	0	0	0	0	0	0	0
CH ₄ (kg)	15	1	0	2	0	0	18

L'agrégation de ces émissions en équivalent carbone est présentée dans le tableau ci-après :

¹ Source: Eco-profiles of the European Plastics Industry, POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET) (AMORPHOUS GRADE), The European Council of Vinyl Manufacturers (ECVM) & PlasticsEurope, March 2005

Tableau 31: Emissions de gaz à effet de serre lors de la production de PET amorphe, BIO Intelligence Service/PlasticsEurope (kg éq C/t)

Gaz	Emissions en équivalent carbone	
	Avec les facteurs de PlasticsEurope	Avec les facteurs de l'IPCC2007
CO ₂	766	766
N ₂ O	0	0
CH ₄	106	126
Total	872	892

Tableau 32: Emissions de gaz à effet de serre lors de la production de PET, BIO Intelligence Service/PlasticsEurope (kg éq. C/t)

Matériaux	PlasticsEurope 1999	PlasticsEurope 2005-2007
PET amorphe	1175	882
PET qualité bouteille	1230	926
PET film	1620	1489

Pour le facteur d'émission de la production de PET secondaire, nous recommandons d'utiliser la valeur publiée par l'USEPA pour le recyclage mécanique. En effet, la production de résine Supercycle® ne représentait en 1998 que 5000t de PET sur un total d'environ 500 000t de PET produit en 1998¹, on fait donc l'hypothèse que ce mode de recyclage du PET est marginal en France.

Tableau 33: Facteurs d'émission de la méthode Bilan Carbone® et facteurs d'émissions proposés pour l'actualisation (kg éq. C /t) (et incertitude estimée)

Matériaux	Bilan Carbone® actuel	Valeurs proposées	Sources
PET 100% vierge	1200	890 (30%)	PlasticsEurope
PET 100% recyclé	400	55 (50%)	USEPA06

¹ Le logiciel donne une production de 5000 t de PET Supercycle® en 1998 qui représente 100% de la production française. Dans la publication de l'ADEME, *BILAN DU RECYCLAGE 1996-2005*, une production de 5000kt est fournie pour tous les types de plastique pour l'année 1998 en France. En supposant que la production de PET représente 10% de ce total on obtient 500 kt de PET produit en 1998.

II.2.3.6 ACTUALISATION : POLYCHLORURE DE VINYLE (PVC)

- **Bibliographie clé:**

- **AEA01** AEA Technology (2001): Waste Management Options and Climate Change. Final report to the European Commission, DG Environment.
- **PlasticsEurope** The European Council of Vinyl Manufacturers (ECVM) & PlasticsEurope (2006) Eco-profiles of the European Plastics Industry, POLYVINYLCHLORIDE (PVC) (SUSPENSION POLYMERISATION)
- **WISARD97** Résultats issus du module "Tri complémentaire et recyclage du PVC en tubes d'assainissement" du logiciel Wisard

- **Valeurs issues des études**

Les facteurs d'émissions recensés dans la littérature sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 34: Facteurs d'émission de gaz à effet de serre pour la production de polychlorure de vinyle primaire et secondaire (kg éq C/t)

Matériaux	Bilan Carbone	PlasticsEurope 2005-2007	AEA01	WISARD97
PVC vierge	520	515	529	563
PVC recyclé 100%	110			17

- **Analyse des valeurs proposées dans les études**

Les facteurs d'émission de gaz à effet de serre proposés dans les différentes publications analysées sont compris :

- entre 530 et 670 kg éq. C/t de PVC pour la production de PVC primaire
- entre 17 et 110 kg éq. C/t de PVC pour la production de PVC secondaire.

Les valeurs publiées dans les études varient fortement d'une étude à l'autre. La valeur proposée par le logiciel WISARD pour la production de PVC secondaire repose sur un recyclage mécanique.

- **Valeurs recommandées**

Comme pour toutes les matières plastiques, nous recommandons de prendre la valeur publiée par PlasticsEurope pour le facteur d'émission de la production de PVC primaire. Le détail des émissions retenues et des valeurs obtenues est récapitulé dans les tableaux suivants.

Tableau 35: Emissions de gaz à effet de serre lors de la production de PVC (kg éq. C/t de PVC), PlasticsEurope¹

	Production de l'énergie	Utilisation de l'énergie	Transport	Process	Biomasse	Total pour 1 tonne
CO ₂ (kg)	906	298	194	598	-47	1774
N ₂ O (kg)	0	0	0	0	0	0
CH ₄ (kg)	3	0	0	1	0	4
CH ₄ (kg) Biomasse	0	0	0	0	0	0

En convertissant les valeurs d'émission du tableau précédent avec les facteurs de caractérisations des GES utilisés, on obtient le tableau suivant :

Tableau 36: Emissions de gaz à effet de serre lors de la production de PVC agrégées en équivalent carbone (kg éq. C/t de PVC), BIO Intelligence Service/PlasticsEurope

Gaz	Emissions en équivalent carbone	
	Avec les facteurs de PlasticsEurope	Avec les facteurs de l'IPCC2007
CO ₂	484	484
N ₂ O	4	4
CH ₄	25	37
CH ₄ Biomasse	0	0
Total	512	515

Pour la production de PVC secondaire, nous recommandons de conserver la valeur proposée par la méthode Bilan Carbone®. En effet le facteur proposé par le logiciel WISARD parvient d'une modélisation qui semble être le recyclage de bouteilles en PVC. Or, les bouteilles en PVC ont aujourd'hui quasiment disparu en France au profit des bouteilles en PET.

Tableau 37: Facteurs d'émission de la méthode Bilan Carbone® et facteurs d'émissions proposés pour l'actualisation (et incertitude estimée)

Matériaux	Bilan Carbone® actuel	Valeurs proposées	Source
PVC 100% vierge	520	515 (20%)	PlasticsEurope
PVC 100% recyclé	110	110 (30%)	USEPA06

II.2.4 VERRE

II.2.4.1 PROCEDES DE PRODUCTION

Les gaz à effet de serre émis lors de la production de verre à partir de matière vierge sont essentiellement dus au processus de fabrication et aux consommations d'énergie. Ainsi la

¹ Source: Eco-profiles of the European Plastics Industry, POLYVINYLCHLORIDE (PVC) (EMULSION POLYMERISATION), The European Council of Vinyl Manufacturers (ECVM) & PlasticsEurope, July 2006

décomposition des matières premières telles que soude caustique, carbonate de sodium ou le calcaire lors de la production du verre en four de fonte émet d'importante quantité de GES.

Plusieurs facteurs peuvent aussi faire varier les émissions de gaz à effet de serre lors de la production de verre. Le premier facteur qui influence les émissions de gaz à effet de serre lors de la production de verre est la consommation d'énergie. L'utilisation de calcin (déchet de verre) lors de la production de verre permet ainsi une certaine économie d'énergie. En effet, la température nécessaire à la fusion du verre ($\approx 1000^{\circ}\text{C}$) est plus basse que celle nécessaire à la fusion des matériaux primaires tels que le sable ou le carbonate de calcium ($\approx 1500^{\circ}\text{C}$). La publication suisse utilisée pour produire le facteur d'émission du verre recyclé propose une formule empirique pour calculer cette économie d'énergie:

$$\text{Economie d'énergie dans le four [\%]} = \frac{1}{4} \times \text{part de verre récupéré [\%]}$$

Toutefois, cette formule n'est utilisable que dans le cas où le verre avec les différents taux de calcin est produit dans le même four. Selon cette même source, outre le taux de calcin utilisé, la technologie du four, l'âge du four et la couleur du verre produit auront une influence sur la consommation énergétique du four. En supposant que cette règle peut s'appliquer pour du verre fait à partir de 100% de calcin, on obtient une diminution de la consommation d'énergie de 25% par rapport à du verre produit à partir de matériaux vierges. On a donc une diminution d'environ 25% des émissions de gaz à effet de serre dues à la consommation d'énergie.

Cette règle empirique est citée et utilisée dans beaucoup d'études, en revanche certaines études mettent en avant ses limites. Ainsi, dans Grant et al (2001), les auteurs préconisent de n'utiliser cette règle que dans la fourchette de 20 à 70 % d'incorporation.

Les émissions de gaz à effet de serre lors de la décomposition des matériaux primaires entrant dans la composition du verre ont aussi un impact important sur les émissions de gaz à effet de serre totales.

Facteurs clés influençant les émissions:

- Consommation d'électricité du four de fonte pour la production de verre primaire.
- Décomposition des matières premières lors de la fusion du verre.

II.2.4.2 FACTEURS D'ÉMISSIONS DU BILAN CARBONE®

• Hypothèses et valeurs utilisées dans le Bilan Carbone®

Plusieurs sources sont exploitées par la méthode Bilan Carbone® :

- Mission Interministérielle de l'Effet de Serre / juin 1999 / Mémento des décideurs.
- US Environment Protection Agency / 1998 / Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste.
- Office Fédéral de l'Environnement et des Paysages / 1998 / Cahiers de l'Environnement, N° 250-I / Déchets, inventaires écologiques relatifs aux emballages, volume I.

La méthode Bilan Carbone® propose des facteurs pour plusieurs types de verre :

Tableau 38: Facteurs proposés dans la méthode Bilan Carbone® pour les différents types de verre.

Modèles de verre considérés dans le Bilan Carbone®	Facteur d'émission proposé dans la méthode Bilan Carbone® (kg éq. C / t)	Sources répertoriées dans le guide des facteurs d'émissions
Verre plat	414	Mission Interministérielle de l'Effet de Serre / juin 1999 / Mémento des décideurs.
Verre bouteille	120	US Environment Protection Agency / 1998 / Greenhouse Gas Emissions From Management of Selected Materials in Municipal Waste.

Modèles de verre considérés dans le Bilan Carbone®	Facteur d'émission proposé dans la méthode Bilan Carbone® (kg éq. C / t)	Sources répertoriées dans le guide des facteurs d'émissions
Verre non différencié	280	Office Fédéral de l'Environnement et des Paysages / 1998 / Cahiers de l'Environnement, N° 250-I / Déchets, inventaires écologiques relatifs aux emballages, volume I.
Verre technique	1000	Modélisation Bilan Carbone®
Fibre de verre	580	Mission Interministérielle de l'Effet de Serre / juin 1999 / Mémento des décideurs.
Verre flacons	400	
Verre recyclé 100%	165	Office Fédéral de l'Environnement et des Paysages / 1998 / Cahiers de l'Environnement, N° 250-I / Déchets, inventaires écologiques relatifs aux emballages, volume I.

Les facteurs retenus pour modéliser un verre d'emballage fait à partir de matière vierge et recyclée sont ceux relatifs au « verre flacon » (400 kg éq. C / t de verre) et au verre recyclé 100% (165 kg éq. C / t de verre).

- **Analyse des sources**

Les facteurs proposés par la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre n'ont pas pu être analysés car la source primaire d'information est indisponible¹.

La source utilisée pour obtenir le facteur d'émission pour le verre flacon n'est pas précisée dans le guide. Toutefois, la moyenne de tous les facteurs hors verre recyclé est égale à 399 kg éq. C / t de verre et il semblerait donc que cette moyenne ait été retenue pour le facteur d'émissions du verre flacon.

Pour le verre produit uniquement à partir de matière recyclée, la source du facteur est la publication de l'Office Fédéral de l'Environnement et des Paysages, déjà utilisé pour les facteurs de l'acier et des métaux ferreux et de l'aluminium. Cette publication s'est basée sur des données suisses pour produire les inventaires utilisés.

Tableau 39: Emissions de gaz à effet de serre, calculé à partir de la publication OFEFP98 en prenant en compte le CO₂, le CH₄ et le N₂O ainsi que les facteurs de caractérisations de Kyoto.

	Verre Vert	Verre Brun	Verre incolore	Verre (GB)
Pourcentage de matériaux recyclés utilisés	99%	61%	55%	0%
Emissions de gaz à effet de serre (kg éq. C / t)	163	213	209	281

Pour calculer les émissions dues à la production de verre à partir de 100% de matière vierge, une interpolation linéaire est réalisée dans le Bilan Carbone® donnant une valeur d'émission de 280 kg éq. C par tonne de verre. Cette interpolation peut être remise en cause du fait de la non-linéarité des émissions de GES avec le taux d'incorporation de calcin.

¹ La source citée par la MIES est la conférence "Buildings and the Environment" qui s'est tenue à Paris en 1997.

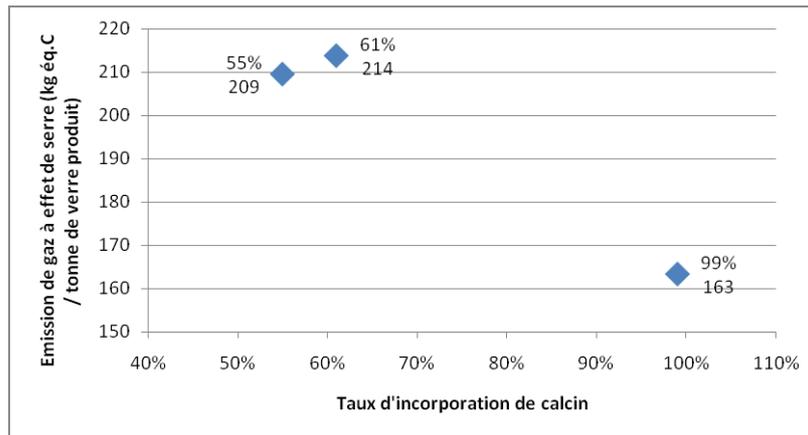


Figure 5: Représentation graphique des émissions de gaz à effet de serre en fonction du taux d'incorporation de calcin dans la production de verre, à partir de l'étude OFEFP98

Toutefois, cette interpolation, bien que discutable, donne une valeur d'émissions proche de celle proposée dans la publication pour la production de verre sans incorporation de calcin. Cette dernière valeur est issue d'une étude anglaise réalisée par BOUSTEAD¹ en 1992. Les données concernant le système énergétique et les matières premières ne sont donc pas les mêmes que celles utilisées pour les inventaires de verre brun, vert et incolore.

Le facteur proposé pour le verre bouteille est issu de l'étude USEPA98. Or comme pour les matériaux plastiques la conversion de short tonne en tonne n'a pas été faite. De plus, seules les émissions dues aux consommations d'énergie ont été intégrées à la valeur.

Tableau 40: Répartition des émissions de gaz à effet de serre pour la production de verre bouteille, USEPA98

	Bilan Carbone [®] (kg éq. C / t de verre)	USEPA98 (kg éq. C / short t de verre)			USEPA98 (kg C éq. / t de verre)		
		Energie et transport	Autres	Total	Energie et transport	Autres	Total
Verre bouteille	120	120	40	160	132	44	176

II.2.4.3 ACTUALISATION

- **Bibliographie clé**

- **ADEME06** ADEME (2006) Bilan du recyclage 1996-2005 Partie 2 Données détaillées par filière Rapport final, Décembre 2006
- **AEA01** AEA Technology (2001): Waste Management Options and Climate Change. Final report to the European Commission, DG Environment.
- **CEREN99** CEREN (1999) Energies par produit
- **EcolInvent v1.3** Inventaires de Cycle de Vie issus de la base de données EcolInvent v1.3 - Flat glass, uncoated, at plant
- **EcolInvent v1.3** Inventaires de Cycle de Vie issus de la base de données EcolInvent v1.3 - Flat glass, coated, at plant
- **EcolInvent v1.3** Inventaires de Cycle de Vie issus de la base de données EcolInvent v1.3 - Glass fibre, at plant
- **EcolInvent v1.3** Inventaires de Cycle de Vie issus de la base de données EcolInvent v1.3 - Packaging glass, brown, at regional storage

¹ Boustead I. (1992) Glass Container Production From Virgin Materials, Database Boustead Consulting Ltd.

- **EcolInvent v1.3** Inventaires de Cycle de Vie issus de la base de données EcolInvent v1.3 - Packaging glass, white, at regional storage
- **EcolInvent v1.3** Inventaires de Cycle de Vie issus de la base de données EcolInvent v1.3 - Glass, virgin
- **ENVIROS03a** ENVIROS CONSULTING for the British Glass Manufacturers Confederation (2003) Life Cycle Carbon Dioxide Emissions - scenario 1 Glass Container Manufacture
- **ENVIROS03b** ENVIROS CONSULTING for the British Glass Manufacturers Confederation (2003) Life Cycle Carbon Dioxide Emissions - scenario 2 Insulation Glass Fibre Manufacture
- **MIES03** Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (2003) Mémento des décideurs.
- **MIES99** Mission Interministérielle de l'Effet de Serre (juin 1999) Mémento des décideurs.
- **OFEFP** Office Fédéral de l'Environnement et des Paysages (1998) Cahiers de l'Environnement, N° 250-I / Déchets, inventaires écologiques relatifs aux emballages, volume I.
- **USEPA98** USEPA (1998) Greenhouse Gas Emissions From Management Of Selected Materials In Municipal Waste
- **USEPA02** USEPA (2002) Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, 2nd Edition
- **USEPA06*** USEPA (2006) Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, 3rd Edition, Chapter 3, Source Reduction and Recycling

- **Valeurs issues des études**

Les facteurs d'émissions pour le verre technique et la fibre de verre n'ont pas été intégrés au tableau suivant car ils ne sont pas recyclables.

Les facteurs d'émissions recensés dans la littérature sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 41: Facteurs d'émission de gaz à effet de serre pour la production de verre (kg éq C/t)

Matériaux	Bilan Carbone®	USEPA 06	OFEFP	MIES03	ENVIROS 03a	ENVIROS 03b	EcolInvent v1.3	CEREN95
Verre plat (100% vierge)	414			414			287	171
Verre bouteille	120	154	281		230			145
Verre flacons	400							
Verre recyclé 100%	165	60	163		144	164	388	
Verre non différencié (100% vierge)	280		281 ¹					

- **Analyse des valeurs proposées dans les études**

Les facteurs d'émission de gaz à effet de serre proposés dans les différentes publications analysées sont compris :

¹ Dans le texte de la source, "Verre d'emballage 100% vierge"

- entre 112 et 164 kg éq. C/t de verre (sauf celui de l'USEPA) pour la production de verre 100% recyclé
- entre 171 et 414 kg éq. C/t de verre pour la production de verre plat.
- entre 145 et 281 kg éq. C/t de verre pour la production de verre bouteille.

Seuls les facteurs concernant le verre recyclé et le verre flacon sont utilisés pour calculer les émissions liées à la production de verre à partir de matières vierge et recyclé. Toutefois, étant donné que la source et la méthode de calcul utilisées pour le facteur du verre flacon ne sont pas mentionnées, nous avons déduit des calculs que ce facteur était une moyenne des facteurs utilisés pour les produits en verre. Il est donc nécessaire de mettre à jour tous les facteurs.

Comparé aux autres facteurs analysés, le facteur d'émission du verre plat proposé par la MIES semble surévalué.

Les valeurs issues du CEREN sont certainement sous-évaluées car elles ne représentent que la partie énergétique des émissions de gaz à effet de serre. Or, une part importante des émissions de gaz à effet de serre de la production de verre est due aux émissions de carbone lors de la transformation des matières premières (carbonate de calcium, soude...).

- **Valeurs recommandées**

Pour le verre flacon, les sources ne permettent pas d'analyser le facteur actuel ou d'actualiser cette valeur. Les émissions du verre bouteille dépendent fortement de la proportion de matériau recyclé utilisé. Nous proposons donc de simplifier la catégorisation en ne conservant que les facteurs d'émissions pour le verre plat, le verre 100% recyclé, et le verre d'emballage 100% vierge. Les facteurs d'émission d'un type particulier de verre bouteille pourront, le cas échéant, être recalculés à partir des deux derniers facteurs d'émission et du contenu en verre recyclé (ou, par défaut, les répartitions indiqués dans le Tableau 39 pour le verre vert, le verre brun et le verre incolore).

Tableau 42: Facteurs d'émission de la méthode Bilan Carbone® et facteurs d'émissions proposés pour l'actualisation (et incertitude estimée)

Matériaux	Bilan Carbone® actuel	Valeurs proposées	Sources
Verre plat	414	414 (30%)	MIES03
Verre recyclé 100%	165	165 (30%)	OFEFP
Verre d'emballage 100% vierge	280	280 (30%)	OFEFP

II.2.5 PAPIER ET CARTON

II.2.5.1 PROCÉDES DE PRODUCTION

Les sources d'émissions de gaz à effet de serre de la production de papier et carton sont essentiellement dues aux consommations d'énergie et au traitement des déchets de production. Les émissions liées aux consommations d'énergie peuvent varier fortement d'une installation à une autre. Par exemple, les usines de production de papier "intégrée" qui produisent la pulpe et le papier utilisent leurs déchets produits lors de la fabrication de la pulpe comme source d'énergie biomasse pour la production de papier. De ce fait, les installations situées près des bassins d'exploitations du bois comme en Finlande ou en Norvège consomment beaucoup moins d'énergie fossile telle que le gaz naturel que les installations françaises ou italiennes qui sont moins bien situées.

De plus, les émissions de gaz à effet de serre de la production de papier/carton vierge et recyclé soulèvent de nombreuses questions méthodologiques. En effet, le point qui influencera le plus les résultats est de savoir s'il faut considérer que le recyclage de ces matériaux permet d'économiser du bois. En effet, si l'on considère que le bois utilisé pour la production de pulpe est coupé dans ce seul

but alors il est nécessaire de comptabiliser les bénéfices découlant des économies de bois réalisées grâce au recyclage. Dans ce cas il faudrait alors intégrer les bénéfices liés à la séquestration du carbone par les arbres non coupés. Toutefois, en Europe, la pulpe est surtout produite à partir de déchets de coupe et donc le bois utilisé n'est pas récolté exclusivement pour cela. Dans ce cas, nous ne pouvons pas considérer que le bois non utilisé grâce au recyclage séquestre encore du carbone. Nous pouvons néanmoins considérer que le bois non utilisé sert pour d'autres utilisations telles que le chauffage ou la production de plaque en laminé.

Facteurs clés influençant les émissions:

- Consommation d'énergie lors de la production de la pulpe et du papier/carton
- Emission de gaz à effet de serre lors du traitement des boues de production
- Approches méthodologiques (séquestration, utilisation alternative du bois non coupé)

- **Hypothèses et valeurs utilisées dans le Bilan Carbone®**

Dans la méthode du Bilan Carbone®, seuls deux facteurs sont proposés : un pour le papier vierge et recyclé et un pour le carton vierge et recyclé.

Ces valeurs sont issues de la même publication de l'USEPA¹ que celle utilisée pour le recyclage des matières plastiques:

- **550 kg éq C** pour une tonne de papier vierge et recyclé
- **500 kg éq C** pour une tonne de carton vierge et recyclé.

II.2.5.2 ANALYSE DES FACTEURS D'ÉMISSIONS DU BILAN CARBONE®

- **Analyse de la source**

- Source : USEPA (1998) Greenhouse Gas Emissions From Management Of Selected Materials In Municipal Waste

Cette étude propose des facteurs d'émissions pour les fractions de papier et carton.

Tableau 43: Facteurs d'émissions pour la production de papier/carton à partir de matière première vierge. (Source USEPA98, p. 34 et calcul BIO Intelligence Service pour la conversion de short tonne en tonne métrique)

	Bilan Carbone® (kg éq. C / t)	base de données utilisée dans USEPA98	USEPA98 (kg éq. C / short t)			USEPA98 (kg C éq. / t)		
			Energie	Autres	Total	Energie	Autres	Total
Papier graphique	550	FAL	570	10	580	628	11	639
		Tellus	530	10	540	584	11	595
Carton (boîte)	500	FAL	420	0	420	463	0	463
		Tellus	510	0	510	562	0	562

Il semblerait que les valeurs retenues résultent d'une valeur médiane entre les données des bases Tellus et FAL. Les conversions de « short ton » en tonnes métriques n'ont pas été effectuées.

Mise à part la citation des bases de données utilisées, les facteurs du papier ne sont pas documentés dans l'étude de 1998, ce qui n'a pas permis de pousser davantage notre analyse.

¹ USEPA (1998) Greenhouse Gas Emissions From Management Of Selected Materials In Municipal Waste

- **Bibliographie clé:**

- **AEA01** AEA Technology (2001): Waste Management Options and Climate Change. Final report to the European Commission, DG Environment.
- **EcolInvent v1.3** Inventaires de la base de données EcolInvent : Paper, woodfree, uncoated, at integrated mill/RER S; Paper, woodfree, uncoated, at non-integrated mill/RER S; Corrugated board, fresh fibre, single wall, at plant/RER S
- **USEPA06** USEPA (2006) Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, 3rd Edition, Chapter 3, Source Reduction and Recycling

- **Valeurs issues des études**

Les facteurs d'émissions recensés dans la littérature sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 44: Facteurs d'émission liés à la production de papier/carton (kg éq. C par tonne).

Emissions de GES lors de la production de Papier/Carton (kg éq. C /t de matière)		Bilan Carbone®	USEPA06	AEAT01	EcolInvent
Papier de bureau	Papier 100% Vierge	550	309	159	360
	Papier 100% recyclé		408	132	
Carton	Papier 100% Vierge	500	63	176 (25% recyclé)	290
	Papier 100% recyclé		68	147	

Aucune étude récente et reconnue (ayant au moins fait l'objet d'une revue critique) sur les impacts de la production du papier et du carton n'a été identifiée lors de l'analyse bibliographique. Les besoins en données actualisées et représentatives du marché européen sur ces thématiques sont donc forts.

Analyse des valeurs proposées dans les études

Les facteurs d'émission publiés par les différentes sources analysées sont compris :

- entre 159 et 360 kg éq. C/t de papier vierge.
- entre 63 et 290 kg éq. C/t de carton vierge.

Pour le papier de bureau, les inventaires de cycle de vie de la base de données EcolInvent ont été choisis¹ pour pouvoir comparer les émissions d'une usine intégrée² et celles d'une usine non-intégrée à celle de papier disponible à un centre régional. Les émissions de gaz à effet de serre sont résumées dans le **Tableau 45**.

Tableau 45: Emissions de gaz à effet de serre de la production de papier vierge.

Emissions de GES lors de la production de Papier (kg éq. C /t de matière)	EcolInvent Usine intégrée	EcolInvent Usine non-intégrée	Papier au centre régional de stockage
Papier	226	400	360

¹ Paper, woodfree, uncoated, at integrated mill/RER S et Paper, woodfree, uncoated, at non-integrated mill/RER S

² Une usine intégrée produit la pulpe et le papier ou le carton tandis qu'une usine non-intégrée ne produit que le papier.

- **Valeurs recommandées**

Le choix de facteurs d'émissions pour le recyclage des papiers/cartons est particulièrement délicat. Concernant les bénéfices du recyclage il n'y a pas de consensus réel sur les émissions évitées en raison de nombreux points méthodologiques délicats tels que :

- la prise en compte de la séquestration des arbres non coupés
- la considération d'une utilisation alternative du bois non coupé (bois énergie)
- la validité de certaines hypothèses de substitution

Par ailleurs, au delà de ces aspects, les besoins en données actualisées sur ces filières sont forts.

Dans ce contexte, le parti a été pris de considérer comme nul les bénéfices du recyclage. Ce résultat fourni par le logiciel ACV WISARD est également repris par l'ADEME. En effet, bien que les consommations énergétiques, d'eau et de réactifs soient moindres pour le pulpage du papier recyclé, d'autres étapes du procédé, plus favorables au papier vierge, sont à prendre en compte (par exemple l'utilisation des chutes de bois comme source d'énergie – renouvelable – ou encore la valorisation du méthane généré comme sous-produit du pulpage du bois).

Par conséquent, nous recommandons de prendre la même valeur pour les émissions de gaz à effet de serre dues à la production de papier/cartons à partir matière vierge qu'à partir de matière recyclée.

Afin de proposer des valeurs les plus actuelles possibles, les valeurs issues de la base de données Ecolinvent ont été retenues. De plus, les usines intégrées sont plus spécifiques des régions scandinaves mais ne connaissant pas la provenance du papier consommé en France, nous avons choisi la valeur relative à l'inventaire de papier disponible au centre régional.

Tableau 46: Facteurs d'émission de la méthode Bilan Carbone® et facteurs d'émissions proposés pour l'actualisation (kg éq C/t) (et incertitude estimée)

Matériaux	Bilan actuel	Carbone®	Valeurs proposées	Sources
Papier	550		360 (50%)	Ecolinvent
Carton	500		290 (40%)	Ecolinvent

II.2.6 RECYCLAGE : LIMITES ET AXES D'AMELIORATION

- **Limites méthodologiques**

- La méthode des stocks utilisée pour évaluer les émissions des matériaux de base produits à partir d'un mix de matières vierges et recyclées ne s'adapte pas à l'évaluation des émissions du recyclage des matériaux de base. Pour évaluer les émissions de gaz à effet de serre issues du recyclage de matières de base, il est ainsi nécessaire de prendre en compte les taux de pertes lors de la phase de collecte/tri (pertes dues à la dégradation des matériaux) et les taux de pertes associés au processus de recyclage. Ainsi recycler 1 tonne de matériau ne permettra pas dans la plupart des cas de produire 1 tonne de matière recyclée mais entre 500 kg et 950 kg. Par ailleurs, en raison de ce choix méthodologique, les bénéfices du recyclage sont alloués lors de l'achat de matière première contenant du recyclé. La méthode des stocks ne permet pas d'attribuer des bénéfices au producteur de déchets qui les oriente vers le recyclage et n'encourage pas forcément cette pratique.
- Le recyclage en boucle fermée est une approximation méthodologique. Les propriétés de la plupart des matériaux se dégradent après un certain nombre de boucles de recyclage (raccourcissement des fibres de papier par exemple) et l'accumulation d'impuretés rend

souvent nécessaire l'adjonction d'une certaine quantité de matière vierge dans les processus de recyclage. Si cette approximation est particulièrement solide pour les métaux, plus facilement recyclables, elle l'est moins pour les matériaux qui se dégradent plus rapidement ou qui perdent de leurs propriétés à chaque boucle de recyclage. Cette approche méthodologique est cependant couramment utilisée dans de nombreuses études.

- **Autres**

- Facteurs à corriger, dus à des erreurs de calculs
 - o Production d'aluminium secondaire
 - o Production de PEHD secondaire
 - o Production de PEBD secondaire
 - o Production de PET secondaire
 - o Production de verre bouteille primaire
- Facteurs à modifier, dû à des sources manquantes ou incomplètes:
 - o Production de PVC secondaire
 - o Production du verre plat
 - o Production de la laine de verre
- Facteurs à ajouter
 - o PVC pour matériaux de construction
 - o PVC pour enduction

- **Axes d'amélioration complémentaires envisageables**

Les éléments qui suivent n'ont pas été intégrés dans l'actualisation compte tenu du fait qu'ils nécessitent de collecter et d'analyser des informations spécifiques (étude de marché, données de flux et de process, ACV,...) qui sortaient du périmètre de l'étude.

- Adapter les facteurs d'émission au lieu de production effectif des aciers et métaux ferreux secondaire, de l'aluminium primaire.
- Actualiser les facteurs en fonction des évolutions technologiques.
- Intégrer les données sur les taux de substitution. Un matériau recyclé n'aura souvent pas les mêmes propriétés mécaniques ou chimiques qu'un matériau vierge. Il sera donc nécessaire d'utiliser une quantité de matériau différente de celle que l'on aurait utilisée pour un matériau vierge. Ainsi, pour fabriquer une tonne de produit en verre à partir de verre recyclé, il est nécessaire d'utiliser plus d'une tonne de verre recyclé.
- Intégrer le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques

Depuis la transposition de la Directive DEEE¹ en France en juillet 2005, les producteurs d'équipements électriques et électroniques doivent permettre le démantèlement et la valorisation de leurs appareils. Le traitement de ces déchets d'équipements électriques et électroniques pourrait donc être intégré à la méthode du Bilan Carbone® compte tenu des forts enjeux environnementaux qu'ils soulèvent. Une rapide recherche bibliographique a montré que peu de données spécifiques étaient disponibles. Cette intégration nécessitant une étude à part entière des flux et des procédés courants et une refonte méthodologique de la méthode pour intégrer le recyclage en boucle ouverte, cette amélioration n'a pas été intégrée en phase 2.

¹ Directives 2002/95/CE et 2002/96/CE

Tableau 47 : Récapitulatif des facteurs d'émissions proposés pour l'actualisation du guide (kg éq C/t)

Matières de base proposées dans le Bilan Carbone®	Sources répertoriées dans le guide des facteurs d'émissions	Ancien Facteur	Nouveau Facteur	Sources nouveaux facteurs	des Facteurs de caractérisation utilisés
Acier ou fer blanc neuf (produits plats)	OFEFP	870	870	OFEFP	IPCC 2007
Acier ou fer blanc recyclé 100%	OFEFP	300	300	OFEFP	IPCC 2007
Aluminium neuf	OFEFP	2890	2680	IAI07	
Aluminium recyclé 100%	OFEFP	670	140	EAA08	
Polyéthylène haute densité neuf	PlasticsEurope 1999	500	520	PlasticsEurope 2005-2007	IPCC 2007
Polyéthylène haute densité recyclé 100%	USEPA98	250	55	USEPA06	
Polyéthylène basse densité neuf	PlasticsEurope 1999	550	570	PlasticsEurope 2005-2007	IPCC 2007
Polyéthylène basse densité recyclé 100%	USEPA98	230	55	USEPA06	
PET neuf	PlasticsEurope 1999	1200	890	PlasticsEurope 2005-2007	IPCC 2007
PET recyclé 100%	USEPA98	400	55	USEPA06	
PVC neuf	PlasticsEurope 1999	520	515	PlasticsEurope 2005-2007	IPCC 2007
PVC recyclé 100%		110	110		
Verre plat	MIES99	414	414	EcolInvent	IPCC 2007
Verre bouteille	USEPA98	120	154	USEPA06	
Verre recyclé 100%	OFEFP	165	165	OFEFP	IPCC 2007
Verre non différencié	OFEFP	280	280	OFEFP	IPCC 2007
Papier	USEPA98	550	360	EcolInvent	IPCC 2007
Carton	USEPA98	500	290	EcolInvent	IPCC 2007

II.3 FACTEURS D'ÉMISSIONS DE LA SECTION DECHETS

Les déchets solides et leurs filières de traitement considérés dans la version 5.0 de la méthode Bilan Carbone® sont compilés dans le tableau suivant :

Tableau 48 : Facteurs d'émission actuels de la méthode Bilan Carbone v5 par fraction et filière (en équivalent carbone par tonne traitée, kg éq C/t)

Filières de fin de vie	Déchets inertes (métaux et minéraux)	Déchets non fermentescibles et combustibles (plastiques)	Déchets fermentescibles et combustibles			Déchets Industriels Spéciaux
			Papier	Cartons	Déchets alimentaires	
Enfouissement sans valorisation	4 (transports)	4 (transports)	404	204	294	125 (centre d'enfouissement de classe II)
Enfouissement avec valorisation		4 (transports)	-48	-32	-33	
Incinération sans valorisation		474	4 (transports)			
Incinération avec valorisation		401	-22	-23	-5	
Recyclage		4 (transports)	4 (transports)			
Moyenne française, valeur par défaut	4 (transports)	156	96	61	42	

Ces facteurs sont analysés en détails dans les paragraphes qui suivent. Cette analyse, présentée par filière est organisée de la façon suivante :

- brève présentation de la filière, des mécanismes et des gaz à effet de serre attendus,
- analyse critique des sources primaires de la méthode Bilan Carbone®,
- lacunes et axes d'amélioration envisageables.

II.4 FACTEURS D'ÉMISSIONS DE LA SECTION DECHETS : INCINERATION

II.4.1 PRESENTATION DE LA FILIERE

La combustion des déchets est associée à des émissions de CO₂, N₂O et de CH₄. Le composé majoritairement émis est de loin le CO₂ (>97% en volume) mais l'estimation la plus délicate est celle des émissions de N₂O, dont les émissions varient fortement selon les procédés et conditions d'opération. La méthodologie d'estimation des émissions de CO₂ est, elle, assez standard.

II.4.1.1 ÉMISSIONS DIRECTES DUES AUX DECHETS

Outre les émissions directes dues aux consommations de carburants (engins sur site, combustible d'appoint, etc.), les déchets sont sources directes d'émissions de GES lorsqu'ils sont traités par la filière incinération.

- **CO₂**

Le CO₂ est le produit final majoritaire de l'oxydation des composés carbonés en incinérateur. La principale difficulté pour établir les émissions de CO₂ considérées comme GES selon les critères du protocole de Kyoto est de distinguer la source du carbone du CO₂. En effet, le carbone d'origine biologique qui s'oxyde en CO₂ n'est pas comptabilisé comme gaz à effet de serre, seul le CO₂ issu des fractions fossiles est considéré.

Ainsi, les déchets contribuant aux émissions de GES lors de l'incinération sont essentiellement les produits de l'industrie pétrochimique: plastiques, textiles synthétiques, pneus et caoutchouc,...

Il est à noter par ailleurs que les technologies de contrôle des fumées ne modifient pas les émissions de CO₂¹.

Facteurs clés influençant les émissions:

- teneur en carbone fossile des déchets ;
- conditions d'incinération (taux d'oxydation, température,...) ;
- co-incinération avec un combustible support.

- **CH₄**

Le méthane lors de l'incinération des déchets est souvent négligé dans les études car il est produit lorsque la conduite des opérations n'est pas optimale. Dans les incinérateurs, il peut être émis dans les zones de réception des déchets si ces derniers fermentent.

Une dépression est habituellement appliquée au niveau des zones de réception des déchets et le méthane éventuellement émis est aspiré dans les chambres de combustion.

En France, il n'existe plus d'incinérateurs semi-continus ou discontinus et tous sont équipés de système de dépression au niveau des fosses de réception, il paraît donc justifié de négliger ces émissions.

- **N₂O**

Dans les conditions usuelles d'incinération, l'azote du protoxyde d'azote formé provient des déchets et non de l'air. Par conséquent, les émissions sont fortement liées à la teneur en azote des déchets. Certains déchets influencent donc plus particulièrement les émissions de N₂O, comme par exemple

¹ Fridriksson GB, Johnsen T, Bjarnasóttir HJ, Slentnes H (2002), Guidelines for the use of LCA in the waste management sector

les textiles ou les déchets de cuisine. Les boues d'épuration incinérées ou co-incinérées influencent fortement les émissions de N₂O.

Les émissions sont fortement dépendantes des conditions d'incinération et des technologies utilisées, notamment les technologies de contrôle des oxydes d'azote (NOx) qui ont tendance à augmenter les émissions de N₂O.¹

Facteurs clés influençant les émissions

- teneur en azote des déchets, quelques déchets susceptibles d'augmenter les émissions: boues, déchets alimentaires protéinés, certains textiles et polymères ;
- technologie d'incinération, notamment les technologies de contrôle des émissions de NOx.
- conditions d'opérations (température, durée de combustion)

II.4.1.2 EMISSIONS INDIRECTES ET DIRECTES NON DUES AUX DECHETS

S'agissant des incinérateurs avec valorisation énergétique, ils satisfont leur autoconsommation électrique. En revanche, les incinérateurs sans valorisation (marginiaux aujourd'hui en France) nécessitent un apport extérieur d'électricité. De plus, la production et l'acheminement des divers réactifs et autres consommables qui peuvent être utilisés sur un site d'incinération pour le traitement des fumées ou des eaux par exemple sont également des sources indirectes de gaz à effet de serre. Enfin, l'utilisation de combustibles fossiles d'appoint peut générer des GES.

II.4.1.3 EMISSIONS EVITEES

Les émissions évitées dans le cas de l'incinération peuvent avoir deux origines:

- la production d'énergie dans le cas des incinérateurs avec valorisation ;
- la valorisation des mâchefers, cendres et refus d'incinération (aciers, métaux) qui peuvent servir de substituts dans certaines industries (ciment, béton...) ou être recyclés (aciers, métaux,...).

II.4.2 ANALYSE DES FACTEURS D'EMISSIONS DU BILAN CARBONE®

II.4.2.1 INCINERATION : PLASTIQUES

II.4.2.1.a Facteurs d'émission pour l'incinération sans valorisation

- **Hypothèses et valeurs utilisées dans le Bilan Carbone®**

La source utilisée pour l'incinération sans valorisation des plastiques est la suivante :

- MEDD (2005), Déclaration annuelle des installations classées soumises à autorisation.

Le carbone fossile contenu dans le plastique est entièrement libéré lors de la combustion. Le facteur d'émission est estimé à **470 kg équivalent carbone par tonne de plastique**, plus 4kg pour le transport. Ces valeurs uniques sont supposées valables tous plastiques confondus.

- **Analyse de la source**

La source citée est une note de l'ADEME² de 2006 qui reprend les données fournies par le MEDD dans le questionnaire de déclaration annuelle des émissions polluantes 2005 des installations classées soumises à autorisation.

¹ Gutierrez M.J., Baxter D., Hunter C., Svoboda K. (2005), Nitrous oxide (N₂O) emissions from waste and biomass to energy plants, Waste Management & Research 23:133-147

² La source originale n'a pas pu être identifiée

La source indique un PCI de 23GJ/t et un facteur d'émission de 75 kgCO₂/GJ pour les plastiques, ce qui permet d'obtenir le facteur d'émission massique de **470 kg éq C/t** utilisé par le Bilan Carbone®. Seul le CO₂ est pris en compte, étant donnée la faible part relative des autres gaz à effets de serre émis lors de la combustion.

La méthode de calcul est explicitée à la page 69 du rapport CITEPA-OMINEA¹. Le rapport indique simplement que « ces facteurs d'émission résultent d'une compilation de données plus ou moins nombreuses selon les types de combustibles ».

II.4.2.1.b Emissions évitées par la valorisation énergétique

- **Hypothèses de la méthode Bilan Carbone®:**

Seule la valorisation électrique est abordée par la méthode Bilan Carbone®, la source utilisée est celle de l'USEPA :

- USEPA (1998), Greenhouse gas emissions from management of selected materials in municipal waste

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.

Tableau 49 : Valeurs utilisées dans le Bilan Carbone®

Nature du matériau incinéré	kg équivalent carbone par tonne économisé par valorisation aux USA (a)	kg équivalent carbone par tonne économisé par valorisation en France (Bilan Carbone®) (a) * 23/167
Polyéthylène (haute ou basse densité)	-510	-70
Polystyrène, PVC	-510	-70
PET	-510	-70
Plastique, valeur moyenne conventionnelle	-510	-70

- **Analyse de la source:**

Les facteurs d'émission proviennent d'une étude de 1998 réalisée par l'agence de l'environnement américaine (USEPA). Cette étude s'inscrit dans une approche cycle de vie et vise à quantifier les émissions de gaz à effet de serre associées aux déchets aux Etats-Unis.

Le tableau suivant présente les facteurs d'émission de l'incinération des plastiques de l'étude de 1998 ainsi que ceux de sa version actualisée de 2006 :

Tableau 50: Synthèse des résultats de l'USEPA pour les émissions évitées par la valorisation énergétique des plastiques (éditions 1998 et 2006)

Matériau incinéré	USEPA 1998				USEPA 2006				Valeur proposée par le Bilan Carbone® (mix US) kg éq C / t
	« Mass burn facility »		« RDF facility »		« Mass burn facility »		« RDF facility »		
	t éq C / short ton	kg éq C / t	t éq C / short ton	kg éq C / t	t éq C / short ton	kg éq C / t	t éq C / short ton	kg éq C / t	
HDPE	-0,56	-617	-0,51	-562	-0,52	-573	-0,47	-518	-510

¹ CITEPA, Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France (OMINEA)

LDPE	-0,56	-617	-0,51	-562	-0,52	-573	-0,47	-518	-510
PET	-0,29	-320	-0,26	-287	-0,27	-298	-0,24	-265	-510

Les données fournies par l'EPA sont présentées en tonnes équivalent carbone par « short ton » de déchets incinérés. Un facteur de conversion en tonnes métriques de 0.907 a été omis dans le facteur fourni par le Bilan Carbone®. Toute considération méthodologique mise à part, les facteurs actuels sont donc sous-évalués.

Par ailleurs, le facteur d'émission attribué au polystyrène n'est pas disponible dans le rapport de l'EPA, et celui du PET ne correspond pas à la source citée. L'étude de l'USEPA montre par ailleurs que les émissions évitées par l'incinération du PET sont inférieures à celles évitées par l'incinération du PE, ce qui n'apparaît pas dans la version actuelle du Bilan Carbone®.

On notera par ailleurs que l'actualisation de l'étude USEPA en 2006 a nivelé les erreurs de conversion.

Les émissions évitées dépendent fortement du contenu carbone du mix. Le Bilan Carbone® utilise par exemple un contenu carbone de 23g C par kWh pour l'électricité en France (soit 84 gCO₂/kWh) et de 167 (soit 612 gCO₂/kWh) pour les Etats-Unis. En supposant que les rendements énergétiques de la conversion de l'incinération en électricité sont sensiblement les mêmes en France et aux Etats-Unis, le Bilan Carbone® utilise les émissions évitées de l'étude de l'EPA en les multipliant par 23/167.

La source citée pour ces contenus carbone est l'IEA¹. L'imprécision de la référence n'a pas permis de remonter à la source pour une analyse plus précise. Les ordres de grandeurs impliqués laissent cependant clairement supposer que **le chiffre de 23 gC/kWh pour l'électricité française correspond à un contenu moyen du kilowattheure**. Cette approche fait fortement ressortir la spécificité nucléaire du mix électrique français avec des faibles émissions de GES.

II.4.2.2 INCINERATION : PAPIERS, CARTONS ET DECHETS MENAGERS

II.4.2.2.a Facteurs d'émission pour l'incinération sans valorisation

Le carbone présent dans le papier, le carton et les déchets alimentaires étant biogénique, la combustion des ces déchets n'entraîne pas d'émissions nettes de gaz à effet de serre. Ainsi, dans le Bilan Carbone®, seul le transport, à hauteur de 4kg équivalent carbone par tonne de déchets, est pris en compte.

II.4.2.2.b Emissions évitées par la valorisation énergétique

- **Hypothèses de la méthode Bilan Carbone®**

Comme pour l'incinération des matières plastiques, la méthode Bilan Carbone® ne considère que la valorisation sous forme électrique et suppose que les rendements sont comparables aux rendements américains. La valorisation thermique n'est donc pas considérée.

La source utilisée est l'USEPA :

- USEPA (1998), Greenhouse gas emissions from management of selected materials in municipal waste

Tableau 51 : Valeurs utilisées dans le Bilan Carbone®

Nature des déchets	kg équivalent carbone par tonne économisé par valorisation aux USA	kg équivalent carbone par tonne économisé par valorisation en France
--------------------	--	--

¹ International Energy Agency www.iea.org

	(a)	(a) * 23/167
Papier	-180	-26
Carton	-190	-27
Déchets alimentaires	-60	-9

- **Analyse de la source:**

Tableau 52: Synthèse des émissions évitées de l'USEPA pour l'incinération avec valorisation des papiers, cartons et déchets alimentaires (éditions 1998 et 2006)

Matériau incinéré	USEPA 1998				USEPA 2006				Valeur proposée par le Bilan Carbone (mix US)
	« Mass burn facility »		« RDF facility »		« Mass burn facility »		« RDF facility »		
	t éq C / short ton	kg éq C / t	t éq C / short ton	kg éq C / t	t éq C / short ton	kg éq C / t	t éq C / short ton	kg éq C / t	kg éq C / t
Papiers (« Office Paper »)	-0,2	-220	-0,18	-198	-0,19	-209	-0,17	-187	-180
Cartons (« Corrugated cardboard »)	-0,21	-231	-0,19	-209	-0,19	-209	-0,18	-198	-190
Déchets alimentaires (« Food waste »)	-0,07	-77	-0,06	-66	-0,07	-77	-0,06	-66	-60

Les facteurs du Bilan Carbone® correspondent aux facteurs proposés par l'EPA pour le papier de bureau (« office paper »), le carton (« corrugated cardboard ») et les déchets alimentaires (« food waste ») valorisés dans un incinérateur de type RDF¹. Par opposition aux incinérateurs de type « mass burn », où tous les déchets sont incinérés sans tri préalable, dans les incinérateurs de type RDF, les fractions combustibles (papiers, plastiques,...) sont séparées des non combustibles (verre, métaux). Le choix des facteurs RDF pour la méthode Bilan Carbone® paraît raisonnable compte tenu du tri sélectif mis en place en France.

Un facteur de 0.907 a été omis pour la conversion des « short tons » en tonnes métriques. Toute considération méthodologique mise à part, les facteurs actuels d'émissions évitées étaient donc sous évalués (bénéfices trop faibles). Comme pour les plastiques, l'actualisation des valeurs de l'USEPA en 2006 a nivelé les écarts relatifs entre les deux études.

II.4.2.3 INCINERATION : DECHETS INERTES

La méthode Bilan Carbone® note que les matériaux inertes mis dans un four ne conduisent pas à des émissions de gaz à effet de serre et seul le transport à hauteur de 4 kg éq C/t est comptabilisé lorsque les déchets inertes sont envoyés en incinération. Etant donné que certains incinérateurs récupèrent le métal fondu. Cette valorisation pourrait être créditée d'émissions évitées si un contenu moyen en métal des fractions envoyées en incinération était connu. Néanmoins, compte tenu de la diversité des

¹ Par opposition aux incinérateurs de type « mass burn », où tous les déchets sont incinérés sans tri préalable, dans les incinérateurs de type RDF, les fractions combustibles (papiers, plastiques,...) sont séparées des non combustibles (verre, métaux)

déchets envoyés, et de l'approche par fraction adoptée dans la méthode, il est peu envisageable d'incorporer ce bénéfice.

II.4.2.4 INCINERATION : LIMITES ET AXES D'AMELIORATION

- **Divers**
 - Erreur de conversion « short ton » - tonne métrique pour l'extraction des données de l'USEPA
 - Manque de transparence sur les facteurs d'émission d'incinération du polystyrène et du PVC.
- **Axes d'amélioration envisageables**
 - Différentiation des facteurs d'émissions par type de plastique. En effet, les pouvoirs calorifiques et les compositions chimiques étant différents, les facteurs d'émissions associés devraient l'être (ce qui était déjà suggéré dans l'étude USEPA de 1998).
 - Intégration des émissions directes de N₂O pour toutes les fractions concernées
 - Intégration de facteurs d'émissions pour l'incinération des déchets industriels spéciaux et des déchets des activités de soins
 - Seule l'incinération avec valorisation électrique est prise en compte. Compte tenu des récentes évolutions de l'incinération en France, une amélioration notable serait d'incorporer dans le guide l'incinération avec valorisation thermique seule et l'incinération avec cogénération.
 - Dans la perspective d'un Bilan Carbone® pour les collectivités, il serait pertinent de proposer un facteur d'émission moyen pour les OM, sur la base de la caractérisation effectuée dans le cadre du MODECOM 1993, et de sa prochaine actualisation en 2009.
 - Proposition d'un facteur d'émission moyen pour les DIB en mélange, qui aurait a priori une incertitude supérieure étant donné qu'à ce jour aucune d'étude de caractérisation n'a été effectuée.

II.4.3 ACTUALISATION

- **Bibliographie clé:**
 - **AEA01** AEA Technology (2001): Waste Management Options and Climate Change. Final report to the European Commission, DG Environment.
 - **Barton02** Barton, P. K. and Atwater, J. W. (2002), Nitrous Oxide Emissions and the Anthropogenic Nitrogen in Wastewater and Solid Waste Journal of Environmental Engineering 128(2):137-150.
 - **CITEPA07** CITEPA (2007), Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France (OMINEA), 4ème Edition.
 - **DanEpa** Base de données EDIP
 - **EMEP06** EMEP/CORINAIR (2006), Emission Inventory Guidebook, prepared by the UNECE/EMEP Task Force on Emissions Inventories and Projections, B921-26 .
 - **ERM06** Fisher, K., Aumonier, S. (2006) Impact of Energy from Waste and Recycling Policy on UK Greenhouse Gas Emissions, ERM for DEFRA.
 - **Fridriksson02** Friðriksson GB, Johnsen T, Bjarnasóttir HJ, Slentnes H (2002), Guidelines for the use of LCA in the waste management sector. Nordtest Project Nr. 1537-01.
 - **IPCC00** IPCC (2000), Intergovernmental Panel on Climate Change, Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories.
 - **IPCC06** IPCC (2006), Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Chapter 5: Incineration and open burning of waste
 - **NHWAP** Campagne de caractérisation des déchets

II.4.3.1 EMISSIONS DIRECTES

- **CO₂**

Le CO₂ émis en sortie de cheminée est issu à plus de 95% du carbone initial, il est donc pertinent d'estimer les émissions en partant de la composition en carbone fossile des déchets incinérés. Les émissions de CO₂ sont davantage sensibles au taux d'oxydation de la combustion qu'aux technologies déployées (traitement des fumées par exemple)(Fri02).

Cette méthodologie du bilan de masse est la plus fréquente dans la littérature. C'est également celle qui est préconisée par le GIEC (IPCC06).

Cette méthodologie nécessite de connaître la quantité de carbone fossile incinérée et un taux d'oxydation représentant l'efficacité de combustion lors de l'incinération. Connaissant la quantité de carbone oxydée, il est alors aisé de calculer les émissions de CO₂ en utilisant la formule suivante :

$$FE_c = \%C_m \times \%C_f \times Ox \times 1000$$

Avec

FE_c : Facteur d'émissions directes de carbone fossile (en kg éq C/t)

%C : Contenu massique de carbone dans le déchet incinéré (en %)

%C_f : Part de carbone fossile (en % du carbone total)

Ox : Taux d'oxydation (en %)

Taux d'oxydation

Le taux d'oxydation du carbone lors de l'incinération est proche de 100% et certaines études n'hésitent pas à considérer cette hypothèse (AEA, ERM). Le GIEC préconise une valeur par défaut plus conservatrice de 95% et propose des valeurs par défaut calculées à partir d'un taux d'oxydation variant entre 95% et 99%. Les calculs de l'USEPA sont effectués en supposant un taux de 98%. Nous proposons de garder cette valeur.

Carbone fossile

Le tableau suivant présente les données relevées dans la littérature permettant de calculer les émissions directes de carbone fossile lors de l'incinération.

Seules les fractions plastiques et textiles ont été compilées. La valeur utilisée par le CITEPA pour réaliser les inventaires nationaux d'émissions de GES dans le cadre du protocole de Kyoto a été rapportée à titre informatif.

Tableau 53 : Contenu carbone et facteur d'émission de carbone relevés dans la littérature

Source	Fraction	Contenu en carbone (% en masse)	Part de carbone fossile (% du carbone total)	Taux d'oxyda- tion (%)	Emissions de C d'origine fossile (kg éq C/t)
		a	b	c	$e=a \times b \times c \times 1000$
CITEPA07	OM	25,6%	43%	95%	105
MODECOM93	OM	21,4%	35%	95%	71
AEA01	Plastiques	61,0%	100%	100%	610
ERM06	Textiles	39,9%	50%	100%	200
	Plastique dense	54,8%	100%		548
	Film plastique	47,8%	100%		478
Fridriksson02	PE	85,6%	100%	95%	813
	PP	85,5%	100%		812
	PS	88,9%	100%		845
	PET	64,0%	100%		608
	PVC	40,1%	100%		381
	Film plastique	64,4%	100%		612
	Emballage plastique dur	65,6%	100%		623
	Autres plastiques	59,0%	100%		561
	Textiles	55,6%	50%		264
IPCC00	Textiles (40% synthétique)	40,0%	20%	95%	76
	Min	20,0%	0%	95%	0
	Max	40,0%	50%	99%	198
	Plastiques	75,0%	100%	95%	713
	Min	67,0%	95%	95%	605
	Max	85,0%	100%	99%	842
USEPA06	HDPE	84,0%	95%	98%	838 [-849]*
	LPDE	84,0%	95%		838 [-849]*
	PET	57,0%	95%		617 [531]*

*valeur obtenue par le calcul, la différence est due aux arrondis successifs

Pour les plastiques, il est possible d'obtenir un ordre de grandeur des émissions attendues en calculant le pourcentage massique de carbone sur la base de la formule chimique du monomère. Il s'agit là d'une approximation puisque de nombreux additifs sont utilisés dans la plupart des plastiques courants :

Tableau 54 : Emissions théoriques de CO₂ (en équivalent carbone) lors de la combustion de polymères plastiques purs

Polymère	Monomère	Formule du monomère	Pourcentage massique de carbone	Emissions de carbone (kgCeq/t)		
				Taux d'oxydation: 95%	Taux d'oxydation: 100%	Bilan Carbone®
PE	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂	92%	874	920	470
PET	(CH ₂) ₂ -O-CO-C ₆ H ₄ -CO-O	C ₁₀ H ₈ O ₄	63%	599	630	
PVC	CH ₂ =CH-Cl	C ₂ H ₂ Cl	41%	390	410	/
PP	CH ₂ =CH-CH ₃	C ₃ H ₆	86%	817	860	/
PS	CH ₂ =CH-C ₆ H ₅	C ₈ H ₈	92%	874	920	/

L'analyse des publications laisse clairement supposer qu'il est peu consistant de considérer un facteur unique à la fois pour les composés à base de PE (LDPE, HDPE) et pour le PET comme proposé dans la méthode Bilan Carbone® actuelle.

En revanche, l'USEPA utilise le même facteur pour le LDPE et le HDPE, ce qui est acceptable pour des composés purs puisque ces polymères sont produits à partir du même monomère. Dans le cas de plastiques avec additifs (certainement plus courants pour les emballages dans les flux d'OM), il est probable d'observer des différences. Cependant les études ne sont pas assez précises quant à la description exacte de ce que représente les intitulés (« plastic foil », « rigid plastic packaging ». Les valeurs fournies par ERM semblant sous évaluée, BIO préconise d'utiliser les données de l'USEPA, soit **838 kg éq C/t de HDPE ou de LDPE**. Cette valeur est en accord avec celles données par les études Fri02 et par le GIEC (fourchette haute).

Concernant le PET, les études USEPA06 et Fridriksson02 donnent des ordres de grandeur comparables, afin de proposer un jeu de données cohérent pour les plastiques nous retiendrons, la valeur de l'USEPA, soit **617 kg éq C/t de PET**.

Pour les ordures ménagères, les données MODECOM93 et CITEPA07 donnent des ordres de grandeurs comparables, et sont spécifiques au contexte français. Nous proposons de retenir celle du MODECOM, soit **70kg éq C/t d'OM**, qui pourra être actualisée lorsque la prochaine campagne de caractérisation MODECOM sera finalisée, au deuxième trimestre 2009.

- **N₂O**

Les émissions de N₂O sont liées d'une part aux technologies d'incinération (type de four, technologie de traitement des fumées,...) et d'autre part aux teneurs en azote des déchets (Barton02).

En 2005 d'après l'ADEME, la répartition du parc des usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) est la suivante :

- le four à grille mobile ou à rouleaux est le type de four le plus répandu et équipe plus de 80 % des incinérateurs d'ordures ménagères en France (plus de 100 unités);
- le four oscillant équipe 16 incinérateurs d'ordures ménagères en France;
- un incinérateur d'ordures ménagères est équipé d'un four fixe;
- 4 unités sont équipées de fours à lit fluidisé.

Quelques ordres de grandeur issus de mesures sur sites sont donnés pour les incinérateurs de type « grille mobile » dans les « Good Practice Guidance » du GIEC et l'étude de Barton02 propose une valeur pour les fours oscillatoires.

Tableau 55 : Analyse bibliographique, émissions de N₂O lors de l'incinération d'ordures ménagères

	Valeur [min-max]	Unité	Valeur en g N ₂ O/t MH	Valeur en kg éq C/t	Méthodologie
IPCC00	50,5-66	g N ₂ O /t MS	2-23	0,2,-1,9	mesures sur site, Allemagne, four à grilles
	50,5-11, max 30	g N ₂ O /t MS	2-4 (max 11)	0,2-0,3 (max 0,9)	mesures sur site, UK, four à grilles
	40-150	g N ₂ O /t MH	40-150	3,3-12,2	mesures sur site, Japon, four à grilles
Barton02	35-65	g N ₂ O /t MH	35-65	2,8-5,3	mesures sur site, Japon, four rotatif
CITEPA07	31	g N ₂ O /t MH	31	2,5	valeur par défaut, France
EMEP06	100	g N ₂ O /t MH	100	8,1	valeur par défaut, Europe

Aucune étude ne fournit de jeu de données assez précis pour proposer des valeurs d'émission par sous fraction. Dans ce contexte, il est proposé d'utiliser une valeur représentative des émissions de N₂O de l'incinération des OM et d'utiliser cette valeur pour toutes les fractions incinérées comportant de l'azote. Cette approche est celle utilisée par l'USEPA.

Ainsi, BIO propose d'utiliser la dernière valeur de 31 gN₂O/t, soit **3 kg C eq/tonne** incinérée. Cette valeur donnée par le CITEPA est récente et adaptée au contexte français. Comme effectué par l'USEPA, BIO recommande d'appliquer cette valeur à l'incinération des papiers, cartons et déchets alimentaires.

- **CH₄**

Le méthane lors de l'incinération des déchets est souvent négligé car il est produit lorsque la conduite des opérations n'est pas optimale. Dans les incinérateurs, il est émis en cas de combustion incomplète des déchets ou éventuellement dans les zones de réception des déchets où ils peuvent fermenter. Les zones de réception des déchets des incinérateurs étant dépressurisés et compte tenu des pratiques du secteur, BIO propose de négliger ces émissions.

II.4.3.2 EMISSIONS INDIRECTES ET DIRECTES NON DUES AUX DECHETS

L'analyse bibliographique n'a fourni aucune étude fiable et adaptée au contexte français permettant d'estimer les émissions indirectes dues par exemple aux consommations d'électricité des incinérateurs ou à la production des réactifs utilisées dans le traitement des fumées.

Dans ce contexte, BIO propose d'utiliser le facteur d'émissions indirectes de l'incinération calculé dans l'étude « Le secteur des déchets ménagers et son rôle dans la lutte contre le changement climatique » réalisée en 2007 pour la FNADE. Les émissions indirectes de GES de l'incinération des déchets ménagers et assimilés consolidées au niveau national et ramenées aux tonnages incinérés donnent ainsi un facteur d'émission de **5 kg éq C / tonne** que BIO propose d'appliquer à toute fraction incinérée. Ce facteur obtenu par une approche de type analyse de cycle de vie tient compte des **consommations électriques moyennes du parc, des émissions liées à l'activité d'engins sur site, des émissions dues à la production des réactifs et autres consommables mais aussi de la construction des sites d'incinération**. Cette valeur a été calculée en étroite concertation avec les experts de la FNADE.

II.4.3.3 EMISSIONS EVITEES

L'objectif de cette section est de présenter une méthode de calcul et des facteurs d'émission par défaut pour les émissions évitées par la valorisation électrique seule, la valorisation thermique et la cogénération.

L'évaluation d'un facteur pour les émissions évitées grâce à la valorisation énergétique nécessite de connaître la quantité d'énergie produite et effectivement utilisée par quantité de déchets incinérés. Les émissions évitées correspondent aux émissions de GES qui auraient eu lieu pour produire une quantité équivalente d'énergie.

Le calcul de facteur d'émission par fraction nécessite donc trois paramètres :

- le contenu énergétique du déchet (pouvoir calorifique inférieur)
- le rendement énergétique
- un facteur de conversion énergie/GES

Les déchets pour lesquels la méthode Bilan Carbone® propose des facteurs d'émissions sont les papiers, les cartons, les plastiques et les déchets alimentaires, seule la valorisation électrique est considérée.

Tableau 56 : Emissions évitées par l'incinération avec valorisation électrique (Bilan Carbone® v5)

	Emissions évitées par la valorisation électrique (kg éq C /t)
Papiers	-26
Cartons	-27
Déchets alimentaires	-9
Plastiques	-73

La formule que BIO propose d'utiliser pour calculer les émissions évitées est la suivante :

$$\text{Évitées} = \text{PCI} \times [\Phi_{\text{elec}} \times \text{FE}_{\text{elec}} + \Phi_{\text{therm}} \times \text{FE}_{\text{therm}}]$$

Avec

- PCI: Pouvoir calorifique de la fraction
- Φ_{elec} : efficacité de conversion de l'énergie calorifique en énergie électrique valorisée, ie vendue ou autoconsommée (0 pour les incinérateurs avec valorisation thermique seule)
- Φ_{therm} : efficacité de conversion de l'énergie calorifique en énergie thermique valorisée, ie vendue ou autoconsommée (0 pour les incinérateurs avec valorisation électrique seule)
- FEelec : contenu en GES du kwh électrique évité (23g éq C/kwh, voir 0)
- FEtherm : contenu en GES du kwh thermique évité (à adapter au contexte local)

Cette approche présente l'avantage de pouvoir être appliquée à n'importe quel déchet dont on connaît le PCI. Il est également possible d'intégrer des paramètres spécifiques à une installation par exemple (efficacité de conversion électrique et thermique). Une telle approche méthodologique permettrait d'inclure d'autres fractions dans le guide en permettant à l'utilisateur d'intégrer des paramètres spécifiques.

Les paragraphes qui suivent visent à proposer des facteurs par défaut pour les fractions combustibles du guide pouvant être utilisé pour toute entité ne disposant pas de données spécifiques pour l'estimation des émissions évitées.

- **Pouvoir calorifique**

Tableau 57 : Pouvoirs calorifiques inférieurs de fractions de déchets (GJ.t)

Fraction Bilan Carbone®	Source	Intitulé de la fraction dans l'étude	PCI (GJ/t)
Papier	NHWAP ¹	Magazines	17.07
		Newspapers	18.55
		Other paper	15.75
	USEPA06	Mixed paper office	15.12
	MODECOM93	Papiers	9.9
		Valeur proposée	15.12
Carton	NHWAP91	Card packaging	16.38
	USEPA06	Corrugated cardboard	16.38
	DanEPA ²	Cardboard	11.13
	MODECOM93	Cartons	9.51
		Valeur proposée	16.38
HDPE/LDPE	USEPA06	HDPE, LDPE	43.47
	DanEPA	PE	31.72
	NHWAP	Bag and films	41.50
		Other dense plastics	40.32
		Valeur proposée	43.47
PET	USEPA06	PET	23.55
	NHWAP	Bottles	22.00
		Valeur proposée	23.55
Déchets alimentaires	USEPA06	Food discard	5.51
	NHWAP	Wet waste	4.17
	MODECOM93	Putrescibles	4.24
	AEA	Putrescibles	3.98
		Valeur proposée	5.51
Autres	DanEPA	PVC	13.32
		PP	32.6
		PS	29.35
OM	MODECOM93	OM	7.56

Les données du MODECOM, bien que spécifiques du contexte français sont anciennes (1993) et les intitulés pas assez précis pour retranscrire le degré de finesse voulu par la méthode Bilan Carbone®. Nous proposons d'utiliser les données de l'USEPA, en bon accord avec d'autres sources de données internationales. Ce choix est également en accord avec celui effectué pour le calcul des émissions directes. En ce qui concerne les OM en mélange, dont la composition peut varier sensiblement selon la situation géographique, nous proposons en revanche de conserver la valeur fournie par le MODECOM, spécifique au contexte français. Cette valeur devrait faire l'objet d'une actualisation avec le prochain MODECOM.

¹NHWAP (1991), Campagne de caractérisation des déchets en Angleterre, www.hm-treasury.gov.uk/media/9/A/Thermal_Methods_mass_balance.pdf

²DanEPA (1996-2000) : Agence danoise de l'environnement, données utilisées dans la base de données ACV EDIP, <http://glwww.mst.dk/waste/Pack-App3ProductSystems.htm>

- **Efficacité énergétique**

Comme annoncé précédemment, le déplacement d'émission ne se justifie que lorsque l'énergie produite est effectivement utilisée. Il convient donc de distinguer le rendement potentiel énergétique (énergie restituée/énergie consommée) du rendement net qui lui prend en compte l'énergie exportée effectivement utilisée. Par exemple, le rendement potentiel des incinérateurs avec valorisation thermique seule est assez élevé, de l'ordre de 70 à 80 %, cependant la demande est souvent fluctuante et parfois inférieure à l'offre, particulièrement en été lorsque la chaleur produite sert à alimenter des réseaux de chaleur collectifs par exemple, les rendements annuels sont donc inférieurs au potentiel. L'alimentation d'installation industrielle en chaleur peut être plus stable au cours de l'année si la chaleur produite est utilisée dans un process de production par exemple.

L'ADEME fournit les ordres de grandeur suivants pour l'efficacité énergétique potentielle (conversion de l'énergie de la chaudière):

- valorisation thermique, par alimentation d'un réseau de chauffage urbain ou distribution à des entreprises et/ou établissements publics : rendement jusqu'à 90%,
- valorisation thermique et électrique (co-génération), par production de chaleur et d'électricité : rendement jusqu'à 80%,
- valorisation électrique, par transformation en électricité à l'aide d'un turboalternateur : rendement jusqu'à 35%.

Le *BREF*¹ fournit les valeurs suivantes :

Tableau 58 : Efficacité énergétique (%) de la valorisation énergétique en France et en Europe (source : BREF incinération 2006, données 2002-2003)

		Europe		France	
		[Min-Max]	Moyenne	[Min-Max]	Moyenne
Valorisation électrique	Production	12.9 - 22	18	4.6 - 17.8	11.4
	Exportation	8.7 - 18	13		8.8
Valorisation thermique	Production	45.9 - 74.3	65.8	9 - 49.6	30.4
	Exportation	29.9 - 72.7	58.8		28
Cogénération	Production		59.4*		
	Exportation		49.3*		

* L'efficacité de la cogénération est calculée en appliquant un facteur de 2.6316 à l'efficacité électrique afin de rendre compte des pertes de conversion et de rendre plus cohérente les comparaisons d'efficacité énergétique entre installation de cogénération (source: wi-BREF)

Les données chiffrées de l'ITOM2002 permettent par ailleurs de calculer l'efficacité réelle du parc d'incinérateurs en 2002 :

¹ European Commission, IPPC (2006), Reference Document for the Application of Best Available Techniques for Waste Incineration

Tableau 59: Calcul du rendement énergétique réel des installations de valorisation énergétique en 2002 (source ADEME)

	Nombre installations	Tonnage traité (kt)	Energie produite (kWh)	Energie produite (GJ/t)	Rendement sur PCI ¹
Electrique seule	28	2 785	1 217 066	1.6	21%
Thermique seule	46	1 947	2 210 902	4.1	54%
Cogénération	38	6 620			
dont électrique			1 683 614	0.9	12%
dont thermique			6 846 273	3.7	49%
Total	112*	11 352*	11 957 855		

*4 installations représentant environ 4% des tonnages valorisés n'avaient pas répondu à l'enquête. Au total en 2002, 11 804 kt sur 12 583 kt de déchets ont été valorisés (soit 94%).

• Calculs des émissions évitées

Pour calculer les émissions évitées, il convient de calculer les émissions qui auraient été générés si une source conventionnelle d'énergie avait été utilisée pour produire une quantité d'énergie équivalente à celle produite par la valorisation. Ces aspects sont discutés en première partie (voir 0).

Afin de proposer des valeurs par défaut et comme discuté en 0:

- un facteur de **23 g éq C/kWh** électrique a été utilisé pour la valorisation électrique,
- pour la valorisation thermique, **ce sont les conditions locales qui doivent guider le choix d'un facteur d'émissions évitées**. Des valeurs sont proposées en 0. Toutefois, afin de proposer un facteur par défaut, une valeur de **76 g éq C/kWh** correspondant au mix thermique européen moyen a été utilisée dans les calculs qui suivent.

Les calculs qui suivent sont basés sur les rendements calculés précédemment. Etant calculés à partir de l'énergie totale produite par les installations, l'auto-consommation des installations de traitement en chaleur ou en électricité est donc elle aussi créditée, cette énergie se substituant à une consommation d'électricité du réseau (énergie électrique) ou à un système de production d'énergie thermique conventionnel (énergie thermique).

Concernant l'énergie thermique, il existe plusieurs débouchés possibles, comme l'alimentation de réseaux de chauffage urbain ou la fourniture de chaleur à des sites industriels. Comme discuté précédemment, l'énergie effectivement valorisée peut être inférieure à l'énergie produite en raison de demande fluctuante (les demandes en chauffage sont par exemple fortement saisonnalisées). **Il convient en théorie de ne créditer que l'énergie effectivement valorisée**. En l'absence de données fiables à l'échelle française sur les débouchés de la valorisation thermique et sur les rendements nets, il a été considéré que toute l'énergie vendue était valorisée afin de pouvoir proposer des valeurs par défaut.

¹ Calcul en utilisant le PCI moyen des déchets ménagers donné par le MODECOM1993, soit 7 592 kJ/kg de matière brute.

Tableau 60: Emissions évitées par la valorisation électrique seule, valeurs par défaut

	PCI (GJ/t)	Valorisation électrique	
		Electricité vendue (GJ/t)	Emissions évitées (kg éq C /t)
	(a)	$\Phi_{elec}: 21\%$ $(b)=(a) \times 21\%$	FE: -23 g éq C/kWh $(c)=(b) \times -23/3.6$
Papier	15,1	3,2	-20
Carton	16,4	3,4	-22
Déchets alimentaires	5,5	1,2	-7
HDPE/LDPE	43,5	9,1	-58
PET	23,6	4,9	-32
OM	7,6	1,6	-10
PVC	13,3	2,8	-18
PP	32,6	6,8	-44
PS	29,4	6,2	-39

Tableau 61: Emissions évitées par la valorisation thermique seule, valeurs par défaut

	PCI (GJ/t)	Valorisation thermique	
		Chaleur vendue (GJ/t)	Emissions évitées (kg éq C /t)
	(a)	$\Phi_{therm}: 54\%$ $(b)=(a) \times 54\%$	FE: -76 g éq C/kWh $(c)=(b) \times -76/3.6$
Papier	15,1	8,2	-172
Carton	16,4	8,8	-187
Déchets alimentaires	5,5	3,0	-63
HDPE/LDPE	43,5	23,5	-496
PET	23,6	12,7	-268
OM	7,6	4,1	-86
PVC	13,3	7,2	-152
PP	32,6	17,6	-372
PS	29,4	15,8	-335

Tableau 62: Emissions évitées par la cogénération, valeurs par défaut

	PCI (GJ/t)	Cogénération				Total évitées (kg éq C/t)
		Electricité vendue (GJ/t)	Emissions évitées (kg éq C /t)	Chaleur vendue (GJ/t)	Emissions évitées (kg éq C /t)	
	(a)	$\Phi_{elec}: 12\%$ $(b)=(a) \times 12\%$	FE: -23 g éq C/kWh $(c)=(b) \times -23/3.6$	$\Phi_{therm}: 49\%$ $(d)=(a) \times 49\%$	FE: -76 g éq C/kWh $(e)=(d) \times -76/3.6$	$(f)=(d)+(e)$
Papier	15,1	1,8	-12	7,4	-156	-168
Carton	16,4	2,0	-13	8,0	-169	-182
Déchets alimentaires	5,5	0,7	-4	2,7	-57	-61
HDPE/LDPE	43,5	5,2	-33	21,3	-450	-483
PET	23,6	2,8	-18	11,5	-244	-262
OM	7,6	0,9	-6	3,7	-78	-84
PVC	13,3	1,6	-10	6,5	-138	-148
PP	32,6	3,9	-25	16,0	-337	-362
PS	29,4	3,5	-23	14,4	-304	-326

II.4.3.4 COMPLEMENT : CAS DES DIS ET DAS

L'objectif de cette section est de proposer des facteurs d'émissions par défaut pour l'incinération des déchets industriels spéciaux (DIS) et des Déchets des Activités de Soins (DAS). Les déchets dangereux constituent un gisement très inhomogène et peu de données spécifiques sur leur incinération ont été identifiées dans la littérature. Des facteurs d'émissions génériques sont donc proposés et certaines hypothèses ont été posées. Compte tenu du faible nombre d'installations (une quinzaine de sites) et de la spécificité de certains traitements (coincinération), les besoins complémentaires en données seraient relativement aisés à couvrir (mesures d'échappement, ACV,...).

II.4.3.4.a Incinération des DIS

Pour les émissions de GES associées à l'incinération des DIS, BIO recommande d'utiliser les facteurs d'émissions de CO₂ et de N₂O proposés par le CITEPA, adaptés au cas français et déjà utilisés pour la réalisation des inventaires nationaux d'émissions dans le cadre du protocole de Kyoto, soit :

- 636 kgCO₂/t ou 173 kg éq C/t pour les émissions de CO₂
- 127 g N₂O/t ou 10 kg éq C/t pour les émissions de N₂O.

Nous supposons que les émissions indirectes et directes non dues aux déchets de l'incinération des DIS sont identiques à celles des émissions de l'incinération des autres fractions. Il convient donc d'ajouter aux émissions directes un facteur de 5 kg éq C/t.

Hors transport amont, l'incinération des DIS est donc associée à un facteur d'émission de **183 kg éq C/t auquel il convient d'ajouter 5 kg éq C/t pour la prise en compte des émissions indirectes., soit un total de 188 kg éq C/t.**

II.4.3.4.b Incinération des DAS

Comme pour les DIS, BIO recommande d'utiliser les facteurs du CITEPA pour les émissions dues à l'incinération des DAS, soit :

- 900 kgCO₂/t ou 245 kg éq C/t pour les émissions de CO₂
- 60 g N₂O/t ou 5 kg éq C/t pour les émissions de N₂O.

Nous supposons que les émissions indirectes et directes non dues aux déchets de l'incinération des DAS sont identiques à celles des émissions de l'incinération des autres fractions. Il convient donc d'ajouter aux émissions directes un facteur de 5 kg éq C/t.

Hors transport amont, l'incinération des DAS est donc associée à un facteur d'émission de **250 kg éq C/t auquel il convient d'ajouter 5 kg éq C/t pour la prise en compte des émissions indirectes., soit un total de 188 kg éq C/t.**

II.4.3.5 SYNTHÈSE DES ÉMISSIONS POUR L'INCINÉRATION

Tableau 63: Emissions nettes dues à l'incinération (kg éq C par tonne incinérée), valeurs par défaut (et incertitude estimée)

	Emissions directes dues aux déchets		Emissions Indirectes et directes non dues aux déchets	Emissions évitées			Emissions nettes (hors transport amont)			
	CO ₂	N ₂ O		Valorisation électrique	Valorisation thermique	Cogénération	Sans valorisation	Valorisation électrique	Valorisation thermique	Cogénération
Papier	0	3	5	-20	-172	-168	8 (20%)	-12 (50%)	-164 (30%)	-160 (30%)
Carton	0	3	5	-22	-187	-182	8 (20%)	-14 (50%)	-179 (30%)	-174 (30%)
Déchets alimentaires	0	3	5	-7	-63	-61	8 (20%)	1 (100%)	-55 (50%)	-53 (50%)
HDPE/LDPE	838		5	-58	-496	-483	843 (20%)	785 (20%)	347 (20%)	360 (20%)
PET	617		5	-32	-268	-262	622 (20%)	590 (20%)	354 (20%)	360 (20%)
OM	70	3	5	-10	-86	-84	78 (20%)	68 (20%)	-8 (20%)	-6 (20%)

Tableau 64 : Emissions nettes dues à l'incinération des DIS et des DAS (kg éq C par tonne incinérée) et incertitude estimée

	Emissions directes dues aux déchets		Emissions indirectes et directes non dues aux déchets	Emissions nettes (hors transport amont)
	CO ₂	N ₂ O		
Déchets industriels Spéciaux	173	10	5	188 (20%)
DAS	245	5	5	255 (20%)

Le facteur d'émissions directes de N₂O étant basé sur l'inventaire CITEPA, qui compile les statistiques au niveau national, nous estimons que l'incertitude liée à ce facteur est relativement faible, de l'ordre de 20%. Il en va de même pour le facteur d'émissions non du aux déchets, qui a été établi en étroite concertation avec les experts de la FNADE, et qui est donc représentatif du cas français.

La principale source d'incertitude est la composition des déchets entrants. Celle-ci a une influence directe sur les émissions évitées par la valorisation énergétique, ainsi que sur les émissions directes de CO₂ fossile.

- Les déchets alimentaires sont ceux dont la composition varie le plus, nous estimons donc que l'incertitude liée à ces facteurs d'émission est de l'ordre de 50%.
- Les fractions papier et carton sont mieux définies, mais il subsiste une variabilité importante dans leur composition, nous estimons les incertitudes sur ce facteur à environ 30%.

La composition des plastiques et leurs propriétés physico-chimiques étant bien caractérisée, l'incertitude associée aux émissions de CO₂ fossile et aux émissions évitées est estimée à 20%. Les facteurs d'émissions associés à l'incinération des DAS et DIS sont basés sur des données d'inventaires spécifiques, une incertitude d'environ 20% est estimée sur ces facteurs.

II.5 FACTEURS D'ÉMISSIONS DE LA SECTION DECHETS : ENFOUISSEMENT

La méthode Bilan Carbone® propose des facteurs d'émissions pour l'enfouissement avec valorisation et l'enfouissement sans valorisation. Ces facteurs sont rappelés ci-après :

Tableau 65 : Facteurs d'émissions de la méthode Bilan Carbone® pour l'enfouissement (kg éq C/t)

Filières de fin de vie	Déchets inertes (métaux et minéraux)	Déchets non fermentescibles et combustibles (plastiques)	Déchets fermentescibles et combustibles			Déchets Industriels Spéciaux
			Papier	Cartons	Déchets alimentaires	
Enfouissement sans valorisation	4 (transports)	4 (transports)	404	204	294	125 (centre d'enfouissement de classe II)
Enfouissement avec valorisation		4 (transports)	-48	-32	-33	

II.5.1 PRESENTATION DE LA FILIERE

II.5.1.1 EMISSIONS DIRECTES DUES AUX DECHETS

En termes d'émissions de GES, l'enfouissement est potentiellement l'une des filières d'élimination des déchets les plus impactante car la décomposition des déchets organiques enfouis conduit à des émissions de méthane, un gaz à fort PRG. C'est également la filière pour laquelle l'estimation des émissions est la plus problématique. Les fortes variabilités spatiales et temporelles des émissions diffuses rendent les mesures directes peu représentatives et forcent l'utilisation de modèles d'émissions.

La décomposition des déchets engendre l'émission de biogaz composé majoritairement de CO₂ et de CH₄ ainsi que de quelques gaz traces. Les proportions de chacun varient fortement selon les conditions d'opération et la composition des déchets.

Lors de l'enfouissement, l'air piégé rend les conditions aérobies et le biogaz est essentiellement composé de CO₂. Après quelques mois, les conditions deviennent anaérobies et du méthane est alors émis.

- **CH₄**

Le méthane est lié à la décomposition anaérobie des déchets par les populations microbiennes. Contrairement au CO₂, il est considéré comme anthropogénique car ce gaz ne serait pas émis si les déchets n'étaient pas enfouis. Seule la fraction de carbone à la fois biodisponible et biodégradable peut potentiellement générer du méthane. Cellulose et hémicellulose composent l'essentiel du carbone biodisponible et biodégradable. A l'inverse, la structure chimique des lignines, qui est un des principaux constituants des parois cellulaires des plantes, la rend hautement résistante à la dégradation microbienne et limite la biodisponibilité des autres constituants des parois cellulaires.

Facteurs clés influençant les émissions:

- Composition du mix de déchets
- Population microbienne
- Contenu nutritif du milieu

- pH
- Teneur en eau (favorise les échanges entre micro-organismes, nutriments et substrats dégradables)
- Nature du sol lors des recouvrements (les sols calcaires limitent l'acidification du milieu et sont généralement associés à des taux de génération de CH₄ plus élevé).
- Proportions de cellulose, hémicellulose et lignines

- **N₂O**

Les émissions de N₂O en centre de stockage sont marginales et sont souvent négligées dans les études analysées. Aucune étude d'inventaire national n'a considéré les émissions directes de N₂O dues aux déchets. Coproduit des réactions de nitrification et dénitrification, le N₂O en centre de stockage représenterait 0,02% de l'azote initial selon une étude¹. Cette étude indique que les conditions anaérobies en centre de stockage limiteraient les réactions de nitrification et de dénitrification, réduisant ainsi les émissions de N₂O. Selon une étude de l'AEA², les valeurs d'émissions relevées dans la littérature (entre 0,009 et 2,7 g/m²/jour) ne représentent pas une part significative des émissions de gaz à effet de serre et peuvent être négligées.

De faibles quantités de peuvent également être émises au niveau des torchères de biogaz. Les émissions de N₂O liées à cette combustion sont estimées à 0,1 g/GJ³ de méthane brûlé, soit environ 0,03 kg éq CO₂, ce qui est négligeable au regard des 400 kg éq CO₂ que représentent 1GJ de méthane.

II.5.1.2 EMISSIONS INDIRECTES ET DIRECTES NON DUES AUX DECHETS

Les consommations électriques sur site, ainsi que les consommations de carburant des engins de manutention des déchets sont sources d'émissions de GES.

II.5.1.3 EMISSIONS EVITEES

Les émissions évitées sont de deux types :

- le CO₂ évité lié à la production énergétique (valorisation du biogaz)
- le carbone séquestré.

D'un point de vue méthodologique, il est possible de considérer que le carbone biologique qui est enfoui et qui ne se décompose pas sort du cycle naturel du carbone et qu'un crédit carbone peut donc être alloué à ce mécanisme.

L'estimation du carbone séquestré est intrinsèquement liée au choix de la période d'étude. A l'issue de cette période, le carbone organique dégradé non minéralisé est considéré piégé. L'essentiel de ce carbone provient des lignines.

II.5.2 ANALYSE DES FACTEURS D'EMISSIONS DU BILAN CARBONE®

II.5.2.1 ENFOUISSEMENT : PLASTIQUES

Le plastique étant un déchet non fermentescible, il ne fait l'objet, lors de son enfouissement, d'aucune réaction chimique particulière. Ainsi, la seule émission considérée dans le Bilan Carbone® est liée au

¹ Baldasano J.M., Soriano C. (2000), Emission of greenhouse gases from anaerobic digestion processes: comparison with other municipal solid waste treatment, Water Science and Technology 41(3):275-282.

² AEA Technology (2001): Waste Management Options and Climate Change. Final report to the European Commission, DG Environment.

³ IPCC 2006, Guidelines for national greenhouse gas inventories, Volume 2, Energy

transport. Les émissions liées à l'enfouissement du plastique sont donc comptabilisées à hauteur de 4kg équivalent carbone par tonne.

II.5.2.2 ENFOUISSEMENT : PAPIERS, CARTONS ET DECHETS ALIMENTAIRES

II.5.2.2.a Enfouissement sans valorisation

- **Hypothèses et facteurs d'émissions utilisés dans le Bilan Carbone®**

L'enfouissement de papier, carton et déchets alimentaires entraîne leur fermentation, responsable d'émissions de CO₂ et de méthane. Les facteurs d'émission utilisés dans le Bilan Carbone® pour l'enfouissement sans valorisation tiennent compte des émissions de méthane et de la séquestration d'une partie du carbone dans les centres d'enfouissement. Les émissions de CO₂ biogénique ne sont pas comptabilisées.

L'unique source utilisée est celle de l'USEPA :

- Greenhouse gas emissions from management of selected materials in municipal waste », USEPA, 1998 (Exhibit 7-6, p108)

Le tableau suivant rappelle les facteurs d'émission retenus par le guide:

Tableau 66 : Valeurs utilisées dans le Bilan Carbone®

Matériau enfoui	Equivalent carbone de la fin de vie (kg eq C par tonne de déchets)
Papier jeté au bureau (moyenne)	400
Carton	280
Déchets alimentaires	290

- **Analyse de la source**

Tableau 67: Synthèse des émissions nettes de l'enfouissement des papiers, cartons et déchets alimentaires de l'USEPA (éditions 1998 et 2006), et valeurs proposées par le guide Bilan Carbone® pour l'enfouissement sans valorisation

Matériau enfoui (sans captage)	USEPA édition 1998			USEPA édition 2006	Valeur proposée dans la méthode Bilan Carbone®
	Emissions brutes	Carbone séquestré	Emissions nettes	Emissions nettes	
	t eq C / t MB	t eq C / t MB	t eq C / t MB	t eq C / t MB	
Papiers (« Office Paper »)	0,58	-0,21	0,39	0,40	400
Cartons (« Corrugated cardboard »)	0,48	-0,22	0,27	0,41	280
Déchets alimentaires (« Food waste »)	0,30	-0,02	0,29	0,39	290

Le facteur retenu dans la méthode Bilan Carbone® pour quantifier les émissions de GES des centres d'enfouissement sans valorisation est issu de l'étude de l'USEPA et **correspond aux émissions nettes des centres d'enfouissement sans captage**. L'intitulé du guide est trompeur car il peut laisser supposer que ce facteur est adapté aux centres d'enfouissement sans valorisation mais avec captage. **Les facteurs d'émissions proposés pour les centres d'enfouissement sans valorisation sont donc en contradiction avec la réglementation en vigueur, puisque celle-ci impose au minimum le captage et le torchage du méthane émis par les déchets enfouis.**

Par ailleurs, la séquestration du carbone est incluse dans le facteur de l'USEPA repris par le guide. Compte tenu des très fortes incertitudes sur l'estimation du carbone séquestré ce point devrait être souligné dans le guide.

Enfin, la conversion de short ton en tonnes métriques n'a pas été prise en compte. Notons que l'étude EPA mise à jour en 2006 affiche des résultats sensiblement différents de l'étude 1998, la méthodologie de calcul ayant été modifiée pour satisfaire le bilan de masse, qui était incohérent.

II.5.2.2.b Enfouissement avec valorisation et calcul des émissions évitées

- **Hypothèses et méthode de calcul du Bilan Carbone®**

Comparée à l'enfouissement sans valorisation, l'enfouissement avec valorisation apporte deux types de bénéfices :

- le méthane n'est plus libéré dans l'atmosphère
- une fois capté, celui-ci peut être utilisé pour fournir de l'énergie sous forme électrique et/ou thermique.

La méthodologie adoptée dans le guide suppose une substitution du biogaz émis par le centre d'enfouissement et entièrement capté avec la même quantité de gaz naturel.

Le facteur d'émission de la méthode Bilan Carbone® est calculé sur la base du **facteur net d'émission** (avec séquestration donc) des installations sans captage du biogaz. Par exemple, pour les déchets alimentaires, les 290 kg équivalent C émis par la fermentation correspondent à 50kg de méthane (en utilisant le PRG du méthane égal à 21). Lorsqu'ils sont brûlés pour valorisation, ces 50kg de méthane émettent 37kg équivalent carbone de CO₂ biogénique, donc non comptabilisés. En revanche, ce CO₂ non fossile se substitue au CO₂ fossile qui aurait été émis avec du méthane d'origine fossile utilisé dans la centrale de référence. Au final, lorsque une tonne de déchets alimentaires est enfouie dans une centre d'enfouissement avec valorisation électrique, le Bilan Carbone® leur attribue un facteur d'émission de -37 kg éq C. De la même manière, sont obtenus les facteurs d'émission pour le papier et le carton, qui valent -52kg et -36kg respectivement, et auxquels il faut ajouter 4kg pour le transport.

Tableau 68 : Détails des calculs des émissions évitées du Bilan Carbone® pour l'enfouissement avec valorisation

Matériau enfoui	Emissions de méthane en équivalent carbone (centre d'enfouissement sans valorisation ni torchage)	Quantité équivalente de méthane	Emissions de CO ₂ due à la combustion de cette quantité équivalente de méthane
	kg éq C / t MB	kg CH ₄ / t MB	kg C / t MB
	(a)	(b) = (a) / PRG _{CH₄} x 44/12	(c) = (b) x M _C / M _{CH₄}
Papiers (« Office Paper »)	400	69	52
Cartons (« Corrugated cardboard »)	280	49	36
Déchets alimentaires (« Food waste »)	290	50	37

Avec PRG_{CH₄} : pouvoir de réchauffement global du méthane (21)

44/12 : facteur de conversion du carbone équivalent en CO₂

M_C/M_{CH₄} : rapport molaire du carbone (12) et du méthane (16)

La méthode de calcul des émissions évitées est correcte dans son approche mais fautive dans sa mise en œuvre car elle est basée sur les émissions nettes (avec séquestration) alors qu'elle devrait être basée sur les émissions brutes. Il conviendrait ainsi d'appliquer les facteurs multiplicatifs aux émissions brutes puis d'y retrancher les émissions évitées par la séquestration (et d'effectuer la

conversion en tonnes métriques). Le calcul correct effectué à partir des données de 1998 fournit ainsi les valeurs suivantes: -312kg pour le carton, -65kg pour les déchets alimentaires, et -315kg pour le papier.

Le second inconvénient de cette méthode est **qu'elle suppose un taux de captage peu réaliste (et peu représentatif du parc français) de 100% du biogaz**. En comparaison, l'étude USEPA suppose un taux de captage de 75% pour les installations avec torchage ou avec valorisation. Par ailleurs, même si certains centres d'enfouissement avec géomembrane peuvent atteindre des taux de captage élevés (jusqu'à 90% environ), considérer une valeur trop élevée pour un facteur par défaut ne serait probablement pas représentatif de l'ensemble du parc français.

Une autre limite méthodologique à noter est que cette approche ne considère que les émissions évitées de combustion d'un volume équivalent de gaz naturel, théoriquement, il conviendrait d'intégrer dans ces émissions évitées :

- l'intégralité du cycle du gaz naturel, depuis son extraction et son acheminement jusqu'à sa combustion,
- l'ensemble des émissions directes et indirectes émises par une centrale thermique.

En outre, cette approche ne permet pas de prendre en compte les rendements de conversion électrique qui ne sont pas identiques entre un groupe électrogène de centre d'enfouissement et une centrale thermique. Enfin, notons que la méthode ne prend pas en compte le fait que la production de méthane des déchets est différée par rapport à leur enfouissement, la décomposition de la matière organique s'étalant sur plusieurs dizaines d'années. Les technologies de capture et de valorisation du biogaz, ainsi que les émissions de gaz à effet de serre des sources d'énergie auxquelles se substitue le biogaz, sont susceptibles d'évoluer sur cette période de temps.

La méthode actuelle présente donc de nombreux défauts.

II.5.2.3 ENFOUISSEMENT : DECHETS INERTES

Les seules émissions prises en compte dans le Bilan Carbone® sont celles liées au transport des déchets inertes vers le site de stockage, soit 4 kg éq C/t.

II.5.2.4 ENFOUISSEMENT : DECHETS INDUSTRIELS SPECIAUX

Les facteurs d'émissions du Bilan Carbone® pour l'enfouissement des déchets industriels spéciaux sont tirés d'une étude FNADE/ADEME publiée en 2003. Cette étude ACV, basée sur l'étude d'un échantillon de 11 sites, fournit une valeur de 125kg éq CO₂ par tonne de déchets enfouis. Le facteur rapporté dans le guide des facteurs d'émission est erroné, puisqu'il omet la conversion en équivalent carbone. Le facteur d'émission correspondant est de **34kg éq C par tonne**.

Aucune autre étude ne fournissant de données aussi récentes et spécifiques n'ayant été identifiée, BIO confirme le choix de ce facteur d'émission.

II.5.2.5 ENFOUISSEMENT : LACUNES ET AXES D'AMELIORATION

• **Limites méthodologiques**

- Méthodologie adoptée peu adaptée au calcul des émissions évitées par la valorisation et erreur dans son application
- Méthodologie adoptée pour la valorisation supposant un taux de captage irréaliste de 100%
- Séquestration prise en compte malgré de fortes incertitudes
- Emissions de méthane différées non prises en compte

• **Divers**

- Erreur de conversion « short ton » - tonne métrique pour l'extraction des données de l'USEPA

• **Axes d'amélioration envisageables**

- Seul l'enfouissement avec captage et valorisation électrique et l'enfouissement sans captage sont actuellement considérés. Le méthane émis et capturé peut être brûlé dans une torchère (89% des installations de captage en France en 2002) ou valorisé (15% des installations ou 36% des tonnages)¹ sous forme électrique et/ou thermique. Une amélioration notable serait donc d'inclure dans le guide les installations avec captage et torchage du biogaz et éventuellement celles avec valorisation thermique seule ou cogénération.

- Une autre voie d'amélioration à explorer serait la prise en compte du décalage temporel qui existe entre l'enfouissement et les émissions de méthane.

II.5.3 ACTUALISATION

• Bibliographie clé

- **ADEME06** ADEME (2006) Bilan du recyclage 1996-2005 Partie 2 Données détaillées par filière Rapport final, Décembre 2006
- **AEA01** AEA Technology (2001): Waste Management Options and Climate Change. Final report to the European Commission, DG Environment.
- **ERM06** Fisher, K., Aumonier, S. (2006), Impact of Energy from Waste and Recycling Policy on UK Greenhouse Gas Emissions, ERM for DEFRA
- **Finnveden00** Finnveden G., Johansson J., Lind P., Moberg A. (2000), Life Cycle Assessment of Energy from Solid Waste
- **Friðriksson02** Friðriksson GB, Johnsen T, Bjarnasóttir HJ, Slentnes H (2002), Guidelines for the use of LCA in the waste management sector. Nordtest Project Nr. 1537-01
- **IPCC06** IPCC (2006), Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Chapter 3: Solid waste disposal
- **Lobo06** Lobo et al., Applications of simulations models to the diagnosis of MSW landfills: an example, 2006
- **Spokas05** Spokas et al., Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems?, 2005
- **USEPA06** USEPA (2006) Solid Waste Management and Greenhouse Gases: A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks, 3rd Edition, Chapter 6, Landfilling

Selon l'ITOM, près de la moitié des déchets ménagers et assimilés sont enfouis en France. On recensait en 2002 361 installations dont la capacité était supérieure à 3000t, représentant 23,7 millions de tonnes de déchets ménagers, soit 98% des tonnages enfouis.

II.5.3.1 EMISSIONS DIRECTES DUES AUX DECHETS

• Potentiel méthanogène

Il existe plusieurs méthodes de calculs des émissions de méthane de l'enfouissement.

Modèle cinétique

Considérant que les émissions de méthane sont différées par rapport à l'enfouissement, le GIEC recommande, pour les inventaires annuels de gaz à effet de serre, d'utiliser une méthode basée sur un modèle cinétique d'ordre 1.

Ce modèle est construit sur l'équation cinétique suivante :

$$Q_{CH_4} = L_0 \times M \times k \times e^{-k(t-x)}$$

Avec :

¹ ITOM 2002, Enquête sur les installations de traitement des déchets ménagers et assimilés : La mise en centre de stockage.

Q_{CH_4} : Quantité de méthane produite par an

L_0 : pouvoir méthanogène (Nm³ CH₄/tonne de déchets)

M : masse de déchets enfouis (tonnes)

K : constante cinétique (an⁻¹)

X : année où les déchets sont enfouis

T : année de l'inventaire des émissions

Bilan de masse

La méthode Bilan Carbone® reprend les facteurs d'émissions calculés par l'USEPA, dont la méthodologie repose sur un bilan de masse (modèle d'ordre 0).

Cette approche est la plus adaptée pour proposer des facteurs d'émissions par fraction, et c'est donc celle qui a été retenue pour l'actualisation de la méthode Bilan Carbone®.

On se ramènera donc au bilan suivant pour traiter les données issues de la littérature :

$$COB_i = \frac{C_{CH_4}}{F_{CH_4}} + COB_{seq}$$

Avec

COB_i : carbone organique biodégradable initial¹

C_{CH_4} : carbone dégradé sous forme de méthane à terme

F_{CH_4} : part de méthane dans le biogaz en moyenne sur la durée de dégradation

COB_{seq} : carbone organique biodégradable séquestré

Ce bilan de masse supposé respecté, le calcul des émissions de méthane et de la quantité de carbone séquestré se ramène à la connaissance de trois facteurs clés :

- Le taux de carbone organique biodégradable dans le déchet enfoui
- La fraction de ce carbone biodégradable effectivement décomposée en méthane lors de l'enfouissement (taux de méthanisation)
- Le taux de méthane dans le biogaz émis par le centre d'enfouissement

Le méthane généré par le centre d'enfouissement (en kg eq C) et la quantité de carbone séquestré sont déduits de ces facteurs de la manière suivante :

$$\text{Avec : } E_{CH_4} = COB_i \times \text{Taux de méthanisation} \times \text{PRG méthane} \times \frac{16}{44}$$

En utilisant un PRG du méthane de 25.

¹ Tout le carbone biomasse n'est pas nécessairement biodégradable, Cellulose et hémicellulose composent l'essentiel du carbone biodégradable. A l'inverse, la structure chimique des lignines, qui est un des principaux constituants des parois cellulaires des plantes, la rend hautement résistante à la dégradation microbienne et limite la biodégradabilité des autres constituants des parois cellulaires.

$$\text{Et : } COB_{seq} = COB_i \times \left(1 - \frac{\text{Taux de méthanisation}}{F_{CH_4}} \right)$$

Le tableau suivant synthétise les valeurs relevées dans les études pour les trois fractions de déchets prises en compte dans la méthode Bilan Carbone®.

- **Cas des ordures ménagères**

Le potentiel méthanogène moyen des OM est calculé en utilisant la composition tirée de MODECOM 93 et des potentiels calculés pour chacune des fractions.

Tableau 69: Composition moyenne des OM en France (MODECOM93)

Composition des OM	Masse humide
Déchets putrescibles	28,6%
Papiers	16,2%
Cartons	9,3%
Complexes	1,4%
Textiles	2,6%
Textiles sanitaires	3,1%
Plastiques	11,1%
Combustibles divers	3,2%
Verres	13,1%
Métaux	4,1%
Incombustibles divers	6,8%
Déchets spéciaux	0,5%
Total	100,0%

On négligera en outre les émissions de méthane dues aux déchets complexes et textiles (qui peuvent contenir une partie biodégradable), qui représentent au total environ 7% des ordures ménagères. Les plastiques, combustibles divers, verres, métaux, incombustibles divers et déchets spéciaux n'émettent pas de méthane lorsqu'ils sont enfouis.

Tableau 70: Potentiel méthanogène et séquestration du carbone: synthèse comparative des valeurs issues de la littérature et sélection de paramètres consensuels¹

Fraction de déchets	Source	Intitulé de la fraction dans la source	Taux de Carbone Organique Biodégradable dans le matériau	Taux de méthanisation (par rapport au COB initial)	Taux de CH ₄ dans le gaz	Carbone séquestré par tonne de déchet (kg éq C /tonne)	Emissions de méthane étude (kg éq C /tonne)	Emissions de méthane recalculées (kg éq C / tonne)	
Papier	USEPA	Journal	47%	8%	50%	391	269	311	
		Papier de bureau	40%	44%	50%	46	1321	1398	
		Magazines	32%	12%	50%	245	307	324	
	IPCC	ERM	Mix papier de bureau	38%	24%	50%	200	707	754
			Papiers/cartons	40%					
		AEA	Papier	32%	27%	50%	147	728	
			Papier	33%	18%	50%	214	483	
	Fridriksson	Journaux/ magazines	37%	48%	48%	0	1505		
		Autres papier	38%	48%	48%	0	1543		
	Finnveden Lobo et al. ²	Journaux	47%	30%	50%	229		989	
Papier		39%	20%	50%	235		655		
Valeur retenue			38%	24%	50%	198		763	
Carton	USEPA	Carton ondulé	44%	22%	50%	245	759	804	
	IPCC	Papiers/cartons	40%						
	Fridriksson	Mix carton	37%	48%	48%		1505		
	Finnveden	Carton ondulé	44%	26%	50%	207		961	
		Mix carton	40%	30%	50%	161		1000	
	Lobo et al.	Carton	40%	21%	50%	234		679	
Valeur retenue			40%	22%	50%	224		736	
Déchets alimentaires	USEPA	Déchets alimentaires	15%	42%	50%	24	491	527	
	IPCC	Déchets alimentaires	15%						
	ERM	Déchets de cuisine	14%	27%	50%	64	320		
	AEA	Déchets de cuisine	15%	38%	50%	38	458		
	Fridriksson	Déchets verts et alimentaire	15%	50%	50%	0	624		
	Finnveden	Déchets alimentaires	15%	50%	50%	60		376	
	Lobo et al.	Déchets alimentaires	19%	32%	50%	69		514	
Valeur retenue			15%	38%	50%	36		477	
OM			14%	28%	50%	63		357	

¹ Les données en bleu sont les hypothèses et résultats tirés des publications. Les valeurs en italiques sont des hypothèses et calculs. La dernière colonne a été calculée lorsque le facteur d'émission n'était pas explicitement indiqué dans l'étude ou, dans le cas de l'étude USEPA, pour actualiser le PRG du méthane.

² Lobo et al., Applications of simulations models to the diagnosis of MSW landfills: an example, 2006

Les trois facteurs clés de ce tableau sont le taux de carbone organique biodégradable, le taux de méthanisation, et le taux de CH₄ dans le biogaz. Pour ce dernier, nous avons choisi la valeur la plus souvent utilisée dans la littérature. Notons que la portion de méthane dans le biogaz varie en général entre 45% et 60%.

Le taux de carbone organique biodégradable fait l'objet d'assez peu de variations entre les études. Pour le **papier**, nous proposons de garder les **38%** proposés par l'USEPA pour le « mix papier commercial », qui est la référence de la méthode Bilan Carbone® actuelle, et qui représente une valeur médiane parmi les études relevées (qui indiquent des concentrations allant de 32% à 47%). Pour le **carton**, les valeurs sont encore moins dispersées, et **40%** correspond à la recommandation du GIEC. Pour les **déchets alimentaires**, le choix est encore plus aisé, puisque la plupart des études fournissent une valeur de **15%**.

Le point le plus délicat est le taux de méthanisation, qui varie fortement en fonction des études, des sous-fractions de déchets, ou des conditions de centre d'enfouissement.

Pour le **papier**, notons tout d'abord que l'étude de Fridriksson et al.¹ suppose 100% de méthanisation, ce qui est une hypothèse fautive. Cette étude mise à part, les valeurs les plus extrêmes sont celles de l'USEPA, qui propose de 8% pour le papier journal à 44% pour le papier de bureau. La moyenne effectuée pour tenir compte du mix « papier commercial » semble encore une fois plus représentative. Les autres valeurs retenues varient entre 20% et 30%. Nous proposons donc d'utiliser le taux de méthanisation du papier de **24%** calculé par l'EPA pour un échantillon moyen de « papier commercial ».

Pour le **carton**, en mettant toujours de côté la valeur de l'étude de Fridriksson et al., les valeurs varient entre 21% et 30%. Nous proposons une nouvelle fois de retenir la valeur de l'EPA de **22%**.

Pour les **déchets alimentaires**, les valeurs fournies varient entre 27% et 42%. La valeur de l'AEA de **38%** étant certainement la plus représentative du cas européen, c'est celle-ci que nous conserverons pour faire nos calculs.

- **Oxydation en surface**

Une partie du méthane généré est oxydé en surface. Parmi les études retenues, celles qui prennent en compte ce facteur utilisent par défaut un **taux de 10%** de méthane oxydé, recommandé en particulier par le GIEC. Cette valeur est également préconisée par l'ADEME.

- **Caractéristiques du centre d'enfouissement**

En 2002, selon l'ADEME, 85% des centres d'enfouissement étaient équipés d'un système de captage du biogaz.

L'efficacité de capture du CH₄ est implicitement supposée de 100% dans la méthode actuelle de calcul des facteurs d'émissions du Bilan Carbone®. Cette valeur varie plutôt entre 25% et 90%, selon les caractéristiques du centre d'enfouissement. L'ADEME s'est basée sur les résultats d'une étude de Spokas² pour fixer les valeurs par défaut pour quatre types de centres d'enfouissement.

¹ Fridriksson et al., Guidelines for the use of LCA in the waste management sector, 2002

² Spokas et al., Methane mass balance at three landfill sites: What is the efficiency of capture by gas collection systems?, 2005

Tableau 71: Efficacité de capture du CH₄, valeurs ADEME par défaut

Type de centre d'enfouissement	Taux de capture par défaut ADEME
Centre d'enfouissement en cours d'exploitation	35%
Centre d'enfouissement avec une couverture temporaire	65%
Centre d'enfouissement avec couverture finale en argile	85%
Centre d'enfouissement avec couverture finale géomembrane	90%

Bien que les déchets soient dans un premier temps tous destinés à des centres d'enfouissement en cours d'exploitation, leur décomposition peut, selon les conditions, continuer à générer du méthane pendant plusieurs dizaines d'années, soit souvent plus que la durée d'exploitation d'un centre d'enfouissement.

Il convient donc **d'utiliser une valeur moyenne**, soit sur la durée de désintégration du déchet, soit sur l'ensemble du parc de centres d'enfouissement français. Nous adopterons la seconde approche et proposons **une valeur par défaut de 70%**¹.

II.5.3.2 EMISSIONS INDIRECTES ET DIRECTES NON DUES AUX DECHETS

La consommation de carburant par les engins utilisés dans les centres d'enfouissement (compacteuses, bulldozer,...) ainsi que les consommations d'électricité entraînent des émissions de GES.

Pour estimer ces émissions, BIO propose d'utiliser le facteur calculé dans l'étude « Le secteur des déchets ménagers et son rôle dans la lutte contre le changement climatique » réalisée en 2007 pour la FNADE. Les émissions de GES, indirectes et directes non dues aux déchets, de l'enfouissement des déchets ménagers et assimilés consolidées au niveau national et ramenées aux tonnages enfouis donnent ainsi un facteur d'émission de **4 kg éq C / tonne** que BIO propose d'appliquer à toute fraction enfouie. Ce facteur obtenu par une approche de type analyse de cycle de vie tient compte des **consommations électriques et des consommations en carburant moyennes du parc, des émissions dues à la production des réactifs et autres consommables mais aussi de la construction des sites d'enfouissement**. Cette valeur a été calculée en étroite concertation avec les experts de la FNADE.

II.5.3.3 EMISSIONS EVITEES

- **Valorisation énergétique**

Le méthane émis et capturé peut être brûlé dans une torchère (89% des installations de captage en France en 2002) ou valorisé (15% des installations ou 36% des tonnages)². La valorisation peut se faire sous forme d'énergie électrique, thermique, ou par cogénération.

Dans le cas où le gaz est brûlé dans une torchère, les émissions de gaz à effet de serre sont nulles, le CO₂ produit de combustion étant biogénique (les émissions de N₂O sont considérées comme négligeables).

¹ Source : FNADE – COVED, confirmée par l'étude de SOLAGRO, "Waste landfilling in Europe : Energy recovery and greenhouse gas mitigation", 2008

² ITOM 2002, Enquête sur les installations de traitement des déchets ménagers et assimilés : La mise en centre de stockage.

La prise en compte des émissions évitées devrait idéalement prendre en compte l'évolution temporelle de la décomposition des déchets dans les centres d'enfouissement. Une tonne de déchets placée en centre de stockage aujourd'hui continuera à générer du méthane dans dix ans et plus, alors que le contexte énergétique et les technologies de captage et de valorisation auront certainement évolué. Toutefois, nous ne traiterons pas les émissions évitées par la valorisation du biogaz de cette façon, pour plusieurs raisons :

- la courbe temporelle de décomposition de la matière organique dans les centres d'enfouissement est source de beaucoup d'incertitudes
- toutes les études de référence calculent les émissions évitées sur la base du contexte énergétique et technologique actuel
- cette méthode doit s'accompagner d'une étude prospective sur l'évolution des technologies de valorisation et de captage et sur les modifications de l'offre énergétique qui sort du cadre de notre étude.

Ainsi, tout en gardant à l'esprit qu'il ne s'agit que d'une approximation, nous calculerons les émissions évitées comme si tout le biogaz était capté et valorisé sous des conditions identiques à la moyenne actuelle. Dans ces circonstances, deux approches sont envisageables :

- la première, utilisée dans la méthode Bilan Carbone® actuelle consiste à estimer que la combustion du méthane issu du centre d'enfouissement pour produire de l'énergie permet d'éviter la combustion de la même quantité de méthane d'origine fossile. Cette approche a l'avantage d'être relativement simple et applicable à toutes les centres d'enfouissement mais ne prend pas en compte l'ensemble des émissions évitées et ne permet pas de différencier le type d'énergie produite (électrique et/ou thermique).
- la seconde, que BIO recommande, consiste à calculer l'énergie produite et effectivement valorisée sous forme thermique et/ou électrique et de calculer les émissions qui auraient été générés si une source conventionnelle d'énergie avait été utilisée pour produire une quantité d'énergie équivalente. Ces aspects sont discutés en première partie (voir 0).

En adoptant cette seconde approche et afin de proposer des valeurs par défaut :

- un facteur de **23 g éq C/kWh** électrique a été utilisé pour la valorisation électrique,
- pour la valorisation thermique, **ce sont les conditions locales** qui doivent guider le choix d'un facteur d'émissions évitées. Des valeurs sont proposées en 0. Toutefois, afin de proposer un facteur par défaut, une valeur de **76 g éq C/kWh** correspondant au mix thermique européen moyen a été utilisée dans les calculs qui suivent.

Les émissions évitées se calculent de la manière suivante :

$$E_{\text{évitée}} = M_{CH_4} \times PCI_{CH_4} \times [\phi_{\text{elec}} \times FE_{\text{elec}} + \phi_{\text{therm}} \times FE_{\text{therm}}]$$

Avec

M_{CH_4} = masse de CH₄ captée et valorisée

PCI_{CH_4} = 13.9 kWh/kg

$E_{\text{remplacée}}$ = facteur d'émission du kWh remplacé

ϕ_{elec} = Efficacité de conversion électrique

FE_{elec} = Facteur d'émission associé au mix électrique

ϕ_{therm} = Efficacité de conversion thermique

FE_{therm} = Facteur d'émission associé au mix thermique

Les taux de captage et taux d'oxydation utilisés dans les formules ci-dessous sont des valeurs « moyennes » proposées par défaut.
 Dans le cas d'un usage particulier, les formules ci-dessous peuvent donc être modifiées en prenant en compte des valeurs plus proches du cas étudié.

II.5.3.4 CALCULS DES FACTEURS D'EMISSION

Afin de proposer des valeurs par défaut pour la valorisation énergétique du biogaz, le taux de captage moyen a été supposé être de 70% et le taux d'oxydation de 10%.

Valorisation électrique seule

Fraction de déchets	Emissions brutes de méthane (kgCH4/t)	Emissions de méthane brutes (kg éq C/t)	Méthane émis dans l'atmosphère (kg éq C/t)	Efficacité de conversion électrique	Efficacité de conversion thermique	Emissions évitées (kg éq C/t)	Carbone séquestré (kg éq C/t)	Emissions dues aux opérations sur site (kg éq C/t)	Facteur d'émission (kg éq C/t)
	a	b	c=b×90%×30%	d	e	f	g	h	i=c-f+g+h
Papier	122	829	224	33%	0%	8	-198	4	22
Carton	117	800	216	33%	0%	8	-224	4	-12
Déchets alimentaires	76	518	140	33%	0%	5	-36	4	103
OM	52	357	96	33%	0%	3	-63	4	34

Cogénération

Fraction de déchets	Emissions brutes de méthane (kgCH4/t)	Emissions de méthane brutes (kg éq C/t)	Méthane émis dans l'atmosphère (kg éq C/t)	Efficacité de conversion électrique	Efficacité de conversion thermique	Emissions évitées (kg éq C/t)	Carbone séquestré (kg éq C/t)	Emissions dues aux opérations sur site (kg éq C/t)	Facteur d'émission (kg éq C/t)
	a	b	c=b×90%×30%	d	e	f	g	h	i=c-f+g+h
Papier	122	829	224	33%	45%	45	-198	4	-14
Carton	117	800	216	33%	45%	43	-224	4	-47
Déchets alimentaires	76	518	140	33%	45%	28	-36	4	80
OM	52	357	96	33%	45%	19	-63	4	18

Valorisation thermique seule

Fraction de déchets	Emissions brutes de méthane (kgCH4/t)	Emissions de méthane brutes (kg éq C/t)	Méthane émis dans l'atmosphère (kg éq C/t)	Efficacité de conversion électrique	Efficacité de conversion thermique	Emissions évitées (kg éq C/t)	Carbone séquestré (kg éq C/t)	Emissions dues aux opérations sur site (kg éq C/t)	Facteur d'émission (kg éq C/t)
	a	b	c=b×90%×30%	d	e	f	g	h	i=c-f+g+h
Papier	122	829	224	0%	85%	69	-198	4	-39
Carton	117	800	216	0%	85%	66	-224	4	-70
Déchets alimentaires	76	518	140	0%	85%	43	-36	4	65
OM	52	357	96	0%	85%	30	-63	4	8

Torchage seul

Fraction de déchets	Emissions brutes de méthane (kgCH4/t)	Emissions de méthane brutes (kg éq C/t)	Méthane émis dans l'atmosphère (kg éq C /t)	Efficacité de conversion électrique	Efficacité de conversion thermique	Emissions évitées (kg éq C/t)	Carbone séquestré (kg éq C/t)	Emissions dues aux opérations sur site (kg éq C/t)	Facteur d'émission (kg éq C/t)
	a	b	c=b×90%×30%	d	e	f	g	h	i=c-f+g+hh
Papier	122	829	224	0%	0%	0	-198	4	30
Carton	117	800	216	0%	0%	0	-224	4	-4
Déchets alimentaires	76	518	140	0%	0%	0	-36	4	108
OM	52	357	96	0%	0%	0	-63	4	37

Les facteurs d'émissions liés aux processus biologiques dépendent de nombreux paramètres (pluviométrie, température, pH, etc...), très variables temporellement et géographiquement. L'incertitude sur ces facteurs est élevée. Une analyse de sensibilité des résultats a été effectuée pour un taux de méthanisation de +50% et -50% par rapport aux facteurs moyens, tous paramètres égaux par ailleurs.

Tableau 72: Analyse de sensibilité des facteurs d'émission au taux de méthanisation (valorisation électrique)

Fraction de déchets	Facteur minimum	Facteur moyen	Facteur maximum
Papier	-177	22	420
Carton	-204	-12	372
Déchets alimentaires	-22	103	352
OM	-54	34	203

L'incertitude intrinsèque sur les paramètres biologiques des centres de stockage entraîne donc une incertitude importante sur les facteurs d'émission.

Note : Dans le cas où une décharge valorise une partie du biogaz capté et torche le reste, le facteur d'émissions E devra être calculé de la manière suivante :

$$E = E_{\text{torchage}} \times t_{\text{torchage}} + E_{\text{valorisation}} \times t_{\text{valorisation}}$$

Avec :

E_{torchage} : Facteur d'émission lié au torchage seul

$E_{\text{valorisation}}$: Facteur d'émission lié à la valorisation seule, selon le type de valorisation

t_{torchage} : Taux de méthane torché

$t_{\text{valorisation}}$: Taux de méthane valorisé

II.5.3.5 FACTEURS D'ÉMISSIONS MOYENS POUR L'ENFOUISSEMENT

Aujourd'hui, en France, 100% des installations captent le biogaz issu du centre d'enfouissement. D'après l'inventaire ITOM 2002, 36% des tonnages sont traités par des centres de stockage qui valorisent ce biogaz, le reste étant torché. De plus, sur les 30 installations qui déclarent le valoriser, 12 le font sous forme d'énergie électrique, 9 sous forme thermique, et 3 en cogénération (1 installation déclare revendre le gaz sur un réseau dédié, et 4 ne précisent pas le mode de valorisation). 234 GWh d'énergie électrique sont revendus à EDF, mais la quantité d'énergie thermique produite, probablement autoconsommée, n'est pas précisée¹. Selon l'observatoire de l'énergie, la production d'énergie à partir du biogaz des centres d'enfouissement s'élevait en 2006 à 440 GWh d'énergie électrique et 6 ktep d'énergie thermique, soit 69.6 GWh².

Ces données pourront être complétées et précisées sur la base de l'inventaire MODECOM, qui sera disponible en 2009.

A partir des données actuellement disponibles, nous considérerons que :

- 100% des centres d'enfouissement captent le biogaz.
- 36% du biogaz capté est valorisé, et 64% est torché.
- 14% du biogaz est valorisé sous forme d'énergie thermique, et 86% sous forme d'électricité

Tableau 73: Facteurs d'émissions moyens pour la France (64% torchage, 36% valorisation électrique, dont 14% thermique et 86% électrique)

Fraction de déchets	Facteur d'émission (kg éq C/t)
Papier	24
Carton	-10
Déchets alimentaires	104
OM	35

II.6 AUTRES AXES D'AMÉLIORATION

II.6.1 TRANSPORTS

• Analyse de l'existant

Un seul facteur est proposé dans la méthode pour toutes les étapes de transport des déchets. L'hypothèse faite est que, quel que soit le mode de traitement, une tonne de déchets est transportée sur 80 km en camion-poubelle de 20 tonnes PTAC rempli à moitié en moyenne sur l'ensemble du parcours. Le facteur d'émission correspondant est de 4 kg éq C/t.

Aucune source particulière n'est mentionnée pour étayer cette hypothèse et il est donc impossible de l'analyser.

Une première analyse montre cependant qu'il est peu réaliste de considérer une valeur identique pour tous les déchets compte tenu :

¹ ITOM 2002, Enquête sur les installations de traitement des déchets ménagers et assimilés : La mise en centre de stockage.

² DGEMP – Observatoire de l'énergie, mai 2007

- des différents trajets possibles pour un déchet (ex : trajet direct vers un centre de traitement ultime ou indirect avec passage par un centre de transfert ou un centre de tri),
- de la densité géographique plus faible de certaines installations (ex : centres de recyclage par rapport aux incinérateurs),
- des différents modes de transport qui peuvent être mobilisés (ex : bennes à ordures ménagères, camions,...)

- **Axes d'amélioration envisageables**

- différenciation des facteurs du transport selon le trajet moyen parcouru par le déchet
- différenciation selon les modes de transport.

- **Description de la méthodologie proposée**

L'analyse bibliographique n'ayant pas permis de dégager de facteurs d'émissions pour la collecte, BIO propose de modéliser cette phase du traitement des déchets.

En première approche, il est possible de distinguer deux cas de figure pour le transport des déchets:

- les déchets sont collectés avec les ordures ménagères (OM et déchets des petites entreprises),
- les déchets vont directement vers un centre de traitement ultime (cas des déchets des grandes entreprises).

Afin de distinguer les trajets et les modes de transports envisageables pour les différentes fractions, BIO propose de différencier :

- les centres à forte densité géographique (centres d'enfouissement, incinérateurs, centres de tri, centre de transfert, site de compostage) et les centres à plus faible densité géographique (incinération des DIS et DAS, centres de recyclage). Cette différenciation est effectuée en attribuant une distance de transport de 40 et 100 km respectivement. Cette hypothèse est basée sur les données de l'étude AEA¹.
- la collecte des ordures ménagères des autres transports.

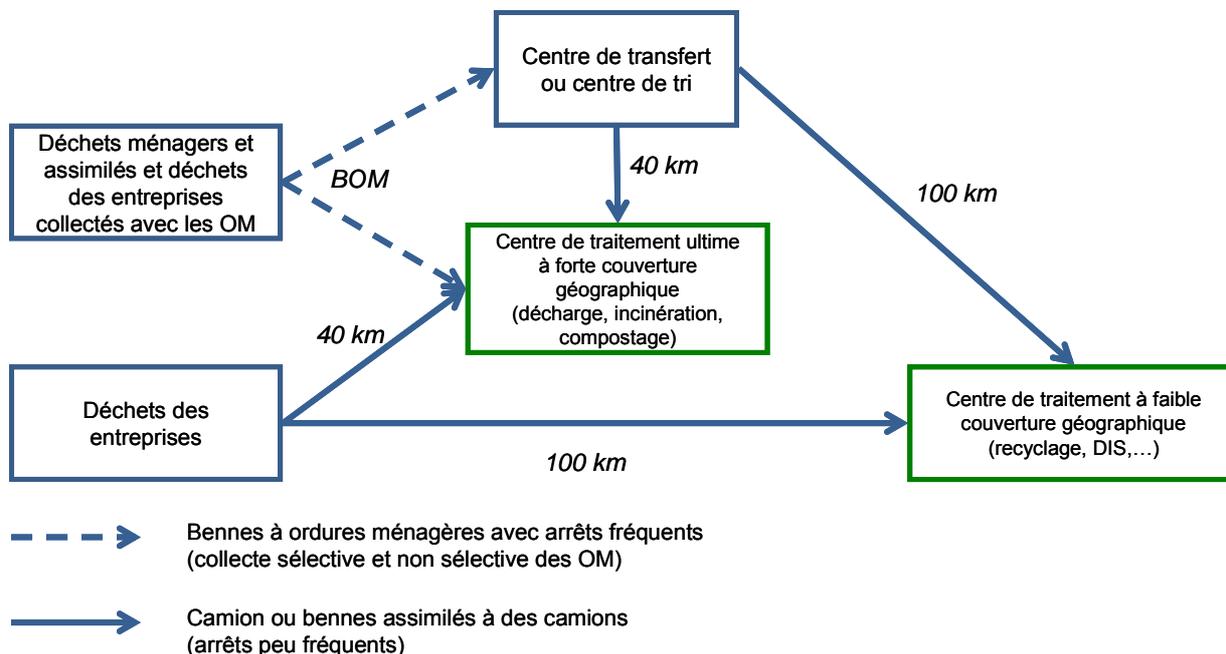
Cette hypothèse est justifiée par le fait que les nombreux arrêts de ce type de collecte augmentent fortement les consommations de carburants. Par simplification, nous supposons identiques les collectes sélectives et non sélectives. Dans le cas des déchets collectés auprès des grandes entreprises et pour les autres transports, nous proposons de conserver la modélisation actuelle (camion de 20t de PTAC), soit 2 kg éq C/t pour un trajet de 40 km et 5 kg éq C/t pour un trajet de 100 km.

Les refus des centres de traitements sont négligés. Il s'agit d'une approximation cohérente avec l'approche globale de la méthode Bilan Carbone®, puisque les facteurs d'émissions sont calculés pour des fractions supposées homogènes.

¹ AEA (2001), Waste management options and climate change, Report for the European Commission

En ignorant les refus de tri, la modélisation proposée est schématisée ci-après :

Figure 6: Modélisation du transport des déchets



• **Facteur d'émission pour la collecte des ordures ménagères**

Nous proposons d'utiliser un facteur d'émissions de 20 kgCO₂/t, soit **5 kg C/t** pour toutes les fractions collectées par les BOM. Ce facteur est issu de l'étude FNADE et a été calculé sur la base des données et hypothèses suivantes :

Tableau 74 : Sources et données pour le facteur d'émission de la collecte

Données	Valeur	Sources
Distance de collecte en porte à porte	11.4 km / t	ADEME (2000), Déchets ménagers: leviers d'amélioration des impacts environnementaux, étude réalisée par BIOIS et ECOBILAN pour l'ADEME et ECOEMBALLAGE
Consommation des bennes	60.5 L/100km	Donnée FNADE
Emissions de la combustion de carburant	2.98 kgCO ₂ /L	Bilan Carbone®

• **Calcul des facteurs d'émissions**

Tableau 75 : Déchets allant directement vers un centre de traitement ultime (grandes entreprises ou trajet direct)

Fractions	Trajet	Facteur d'émission (kg éq C/t)
Fractions recyclables	Transport vers centre de traitement ultime à faible densité	5
DIS		
DAS		
Autres fractions ou autres filières	Transport vers centre de traitement ultime à forte densité	2

Tableau 76 : Déchets collectés avec les ordures ménagères (déchets des ménages, des petites entreprises ou trajets indirects)

Fractions	Trajet	Facteur d'émission (kg éq C/t)
Fractions recyclables collectées avec les OM	Transport vers un centre de tri ou un centre de transfert	5
	Transport depuis le centre de tri ou de transfert vers le centre de recyclage	5
	Total	10
Autres fractions	Transport vers un centre de traitement ultime (77%) ¹	77% x 5
	Transport vers un centre de transfert puis vers un centre de traitement ultime (23%)	23% x (5 + 2)
	Total	5

¹ En 2002, 5 619 277 tonnes d'OM sur 24 307 567 passaient par un centre de transfert après collecte, soit 23% des déchets collectés

II.6.2 COMPLEMENT : CAS DE LA METHANISATION

• Bibliographie clé

- **ADEME05** ADEME (2005), Impacts environnementaux de la Gestion Biologique des Déchets.
- **AEA01** AEA Technology (2001): Waste Management Options and Climate Change. Final report to the European Commission, DG Environment.
- **ERM06** Fisher, K., Aumonier, S. (2006), Impact of Energy from Waste and Recycling Policy on UK Greenhouse Gas Emissions, ERM for DEFRA
- **Fin00** Finnveden G., Johansson J., Lind P., Moberg A. (2000), Life Cycle Assessment of Energy from Solid Waste
- **Fric05** Fricke K., Santen H., Wallmann R. (2005) Comparison of selected aerobic and anaerobic procedures for MSW treatment, Waste Management 25:799-810.
- **Friðriksson02** Friðriksson GB, Johnsen T, Bjarnasóttir HJ, Slentnes H (2002), Guidelines for the use of LCA in the waste management sector. Nordtest Project Nr. 1537-01
-
- **Mu06** Murphy J. D., Power N. M. (2006). A Technical, Economic and Environmental Comparison of Composting and Anaerobic Digestion of Biodegradable Municipal Waste. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 41 (5), 1093-4529

II.6.2.1 PRESENTATION DE LA FILIERE

La méthanisation est une dégradation anaérobie contrôlée des déchets.

La France a été le premier pays à se lancer dans la méthanisation des déchets ménagers en 1988 à Amiens, puis à Varennes-Jarcy (Essonne) en 2002. Quelques unités supplémentaires sont fonctionnelles et certains projets sont en cours de réalisation mais le nombre d'installations reste globalement faible. Les procédés industriels les plus courants en France sont Valorga®, un procédé mésophile sec (Varenne-Jarcy, Amiens), et Kompogas® un procédé thermophile sec (Le Robert, Montpellier).

Bien que tout le biogaz produit soit capté dans les réseaux de l'installation, nous avons pu relever, dans la bibliographie, quelques références qui mettent en évidence des émissions gazeuses liées au traitement par digestion anaérobie. Ces émissions peuvent avoir différentes origines : combustion du biogaz au niveau de la torchère, oxydation thermique du biogaz lorsqu'il est brûlé dans les moteurs thermiques, émissions au niveau de la maturation du digestat. Généralement, le manque d'information limite les possibilités pour retracer les sources considérées.

II.6.2.2 EMISSIONS DIRECTES BRUTES DUES AUX DECHETS

Emissions en cas de fuites de gaz

Les GES émis par les installations peuvent résulter de fuites de gaz. Le GIEC estime ces fuites entre 0 et 10% (IPCC06), et préconise une valeur par défaut de 5% en l'absence de données spécifiques. Le GIEC confirme cependant que dans les installations modernes les taux de fuite sont négligeables.

Seule l'étude ERM (ERM06) considère des fuites de biogaz de 0.5% pour l'estimation des émissions directes brutes et utilise un facteur de 0.0213 kg CH₄/t.

AEA néglige cet aspect par manque de données mais effectue une analyse de sensibilité, un taux de 0.5% de fuite serait associé à l'émission de 0.46 kg CH₄ par tonnes de déchets putrescibles soit environ 10 kg CO₂/t. De faibles fuites peuvent donc avoir un impact notable sur le bilan global des émissions de GES d'une installation de méthanisation.

L'ADEME néglige ces fuites (ADEME05).

L'estimation des émissions en cas de fuites nécessite de connaître les quantités de gaz générés et la composition du biogaz. Les résultats suivants sont issus de l'étude de l'ADEME sur la Gestion Biologique des déchets ménagers (ADEME05) :

Tableau 77: Quantités typiques de biogaz produit en méthanisation par substrat¹

Substrat	Production de biogaz		
	m ³ /t _{entrante}	m ³ /t MS _{entrante}	m ³ /t MV _{entrante}
OM	100 à 150	150 à 400	500
Biodéchets	80 à 200	180 à 350	200 à 400

Pour la composition du biogaz de méthanisation, l'ADEME propose les valeurs guides suivantes:

Tableau 78: Composition typique du biogaz

CH ₄	CO ₂	H ₂ O	H ₂ S	N ₂
50%-70%	30%-50%	5%	0.02%-0.5%	0%-5%

On supposera un taux de fuite de 0,5%, ainsi qu'une production de biogaz moyenne de 125m³/tonne et un taux de CH₄ dans le biogaz de 60%. Le facteur d'émission (en kg éq C/tonne) lié à ces paramètres est de (en prenant une densité du méthane de 0.717kg/m³) :

$$FE_{\text{fuites}} = 0.5\% \times 60\% \times 125 \times \text{Densité}_{\text{CH}_4} \times \text{PRG}_{\text{méthane}} \times 12/44 = 1.8 \text{ kg éq C/tonne}$$

Facteurs d'émissions relevés dans la littérature :

Dioxyde de carbone biogénique mis à part, une installation optimisée émet des GES dans des proportions négligeables et peu de facteurs d'émissions ont été trouvés dans la littérature.

Le GIEC néglige les émissions de N₂O en sites de méthanisation et justifie cette approche par l'absence de données fiables et la faiblesse des émissions. Seule l'étude ERM (ERM06) considère les émissions de protoxyde d'azote et utilise un facteur d'émission de 0.0015 kg N₂O/t.

Aucune estimation de CO₂ d'origine biogénique n'a été relevée. Une approche possible permettant d'y parvenir est d'utiliser les données sur la composition et les volumes de biogaz produits.

II.6.2.3 EMISSIONS DIRECTES DUES AUX OPERATIONS SUR SITE

Malgré la diversité des installations, les consommations en carburant des procédés et engins déployés sur les sites de méthanisation sont assez homogènes.

Tableau 79: Consommation en carburant des installations de méthanisation

Source	Carburant
ERM06	1.3 kg diesel/t
Données FNADE	1 L diesel / t + 1L fuel /t
Fric05	0.5 kg diesel /t

Les valeurs communiquées par la FNADE, plus représentative a priori de la situation française, seront utilisées comme valeurs par défaut. Les émissions liées à la consommation de diesel et de fuel sont

¹ ADEME, Gestion Biologique des déchets ménagers, 2005

de 0,804 kg éq C/L. Les émissions directes dues aux opérations sur site s'élèvent donc à **2 kg éq C/tonne**.

II.6.2.4 EMISSIONS INDIRECTES ET EVITEES

Les installations de méthanisation valorisent le biogaz et génèrent une énergie suffisante à leur autoconsommation, les émissions indirectes dues à la consommation d'électricité sont donc nulles.

Les émissions évitées ont trois origines :

- les refus en entrée peuvent être renvoyés en recyclage, et sont alors associés à un déplacement d'émission. Les études intégrant cet aspect utilisent le facteur d'émission du recyclage (AEA01).
- la valorisation électrique, thermique ou cogénération conduit à un déplacement d'émission.
- le compost produit peut être associé à des émissions évitées en se substituant à la production de fertilisants chimiques.

Valorisation énergétique

Le biogaz produit lors de la phase de fermentation active est entièrement capté et stocké. Après stockage, plusieurs voies de traitement et/ou de valorisation peuvent être envisagées :

- la combustion en torchère (sécurité et réduction des émissions de méthane)
- la valorisation thermique
- la valorisation électrique
- la « co-génération »
- la production de méthane carburant
- l'injection du méthane épuré dans le réseau de gaz naturel.

Etant donné la taille et les caractéristiques du parc français actuel et le peu de données disponibles, seuls les aspects liés à la valorisation énergétique ont été abordés. En 2004, les installations de méthanisation en France valorisaient principalement le biogaz produit sous forme d'énergie thermique.

Le PCI du biogaz est directement lié à sa teneur en méthane et vaut (ADEME05) :

$$PCI_{\text{biogaz}} = 9.94 \times \%CH_4 \text{ (en kWh/Nm}^3\text{)}$$

L'énergie produite par tonne de déchets dépend de la composition de ceux-ci, des procédés de méthanisation employés, et de l'efficacité de la conversion électrique.

En France en 2004, pour 152 000 tonnes de déchets traités par méthanisation, 23.27 GWh d'énergie thermique ont été produits, et vendus représentant environ 1770 tonnes éq C d'émissions évitées, soit, ramené à 1t de déchets, **12kg éq C/tonne**¹. Ceci est une valeur par défaut, et il est recommandé, si les données sont disponibles, d'adopter une approche au cas par cas en fonction de données d'activités spécifiques et de l'énergie substituée (électrique ou thermique)

¹ En utilisant le contenu carbone du mix thermique européen : 76 g éq C par kWh

Compost

Valeurs types et méthodologie sont disponibles dans la partie compostage.

Le tableau suivant rapporte uniquement les quantités de compost produites par les installations de méthanisation, les émissions évitées dépendent du substitut considéré.

Tableau 80: Quantité de compost produite par la méthanisation

Source	Compost
ADEME05	200-780 kg MS/t MS
AEA01	400 kg/t
Mu06	415 kg/t
ERM06	241 kg/t
Fin00	858 kg/t

Selon ITOM 2004, 77kt de compost ont été produites par les installations de méthanisation, pour 152kt de déchets entrant, soit en moyenne 510kg de compost par tonne. Cette valeur d'accorde bien avec les résultats des études citées dans le tableau ci-dessus, et sera utilisée par défaut.

On suppose en outre que le compost produit est utilisé comme substitut aux engrais. Les émissions évitées sont donc de **9kg éq C/tonne¹**.

II.6.2.5 SYNTHÈSE

Tableau 81: Facteurs d'émissions moyens pour la méthanisation (kg éq C/tonne)

Emissions directes dues aux déchets	Emissions directes et indirecte non dues aux déchets	Emissions évitées		Total
		Substitution aux engrais	Valorisation énergétique	
2	2	-9	-12	-17 (50%)

Nous estimons l'incertitude liée aux procédés biologiques à environ 50%. Le facteur d'émission final étant lié principalement à la quantité de compost produite et à la quantité de méthane disponible pour la valorisation énergétique, (tous deux dépendants des processus biologiques), l'incertitude globale est également estimée à 50%.

II.6.3 COMPLÉMENT : CAS DU COMPOSTAGE

• Bibliographie clé

- **ADEME05** ADEME (2005), Impacts Environnementaux de la Gestion Biologique des Déchets.
- **AEA01** AEA Technology (2001): Waste Management Options and Climate Change. Final report to the European Commission, DG Environment.
- **Barton02** Barton, P. K. and Atwater, J. W. (2002), Nitrous Oxide Emissions and the Anthropogenic Nitrogen in Wastewater and Solid Waste Journal of Environmental Engineering 128(2):137-150.
- **Beck01** Beck-Friis B., S. Smars, H. Jonsson, H. Kirchmann, (2001). Gaseous emissions of carbon dioxide, ammonia and nitrous oxide from organic household waste in a compost reactor under different temperature regimes. Journal of Agricultural Engineering Research, 78(4):423-430.
- **CITEPA07** CITEPA (2007), Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions

¹ Voir II.6.3

- atmosphériques en France (OMINEA), 4ème Edition.
- **ERM06** Fisher, K., Aumonier, S. (2006) Impact of Energy from Waste and Recycling Policy on UK Greenhouse Gas Emissions, ERM for DEFRA.
 - **Fin00** Finnveden G., Johansson J., Lind P., Moberg A. (2000), Life Cycle Assessment of Energy from Solid Waste
 - **He98** Hellebrand H.J., 1998. Emission of nitrous oxide and other trace gases during composting of grass and green waste. Journal of Agricultural Engineering Research, 69(4):365-375.
 - **IPCC06** IPCC (2006), Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Chapter 4: Biological treatment of solid waste

II.6.3.1 PRESENTATION DE LA FILIERE

Le compostage est un procédé biologique de conversion et de valorisation des déchets organiques qui consiste à faire fermenter, dans des conditions contrôlées, des déchets organiques en présence de l'oxygène de l'air (conditions aérobies). Deux phénomènes se succèdent dans un processus de compostage. Le premier, amenant les résidus à l'état de compost frais, est une fermentation aérobie intense : il s'agit essentiellement de la décomposition de la matière organique fraîche à haute température (50-70°C) sous l'action de bactéries ; le deuxième, par une fermentation moins soutenue, va transformer le compost frais en un compost mûr, riche en humus. Ce phénomène de maturation, qui se passe à température plus basse (35-45 °C), conduit à la biosynthèse de composés humiques par des champignons.

Les émissions gazeuses du compostage sont liées d'une part à la composition du substrat et d'autre part aux conditions d'opération.

Les fractions fermentescibles présentées dans le guide Bilan Carbone® sont les papiers, les cartons et les déchets alimentaires.

II.6.3.2 EMISSIONS DIRECTES DUES AUX DECHETS

• CO₂

Le CO₂ est le produit final de la dégradation des composés carbonés par les microorganismes aérobies, son émission est donc indissociable du procédé. C'est par ailleurs un bon indicateur de la performance métabolique de la décomposition. Le carbone émis étant de source biogénique, il n'est pas comptabilisé dans les bilans effet de serre du compostage.

• CH₄

En théorie, lorsqu'elles sont correctement réalisées, les activités de compostage ne génèrent pas de méthane car elles nécessitent des conditions aérobies strictes et un contrôle précis des teneurs en eau afin de favoriser la décomposition aérobie des déchets. Les émissions de méthane en compostage sont donc dues à la présence de poches reproduisant localement des conditions anaérobies. De plus le méthane éventuellement formé dans les poches anaérobies s'oxyde en partie en CO₂ lorsqu'il parvient en surface. Une bonne conduite d'opération sur site de compostage ne devrait pas donner lieu à des émissions de méthane.

L'analyse des documents révèle ainsi qu'entre 0.02% et 0.6% du carbone initial est émis sous forme de méthane, plusieurs études s'accordent pour définir 0.5% comme une valeur fiable.

Facteurs clés limitant les émissions de CH₄:

- aération contrôlée et surtout homogène ;
- apport d'eau limité pour maximiser la perméabilité des andains et donc limiter la formation de zones anaérobies locales ;
- apport d'air suffisant.

Méthodologie de calcul des facteurs d'émission :

Aucune méthodologie particulière n'est identifiée, les facteurs résultent de mesures effectuées en laboratoire ou directement sur des sites.

Tableau 82: Facteurs d'émissions directes de CH₄ relevés dans la littérature

Source	Facteur d'émission	Unité	Méthodologie	Substrat
ADEME05	40 [10-200]	kg eq CO ₂ / t MS	revue bibliographique valeur par défaut [min-max]	Déchets ménagers (65% MS)
CITEPA07	952	g CH ₄ /t (MB)	-	biodéchets
ERM06	30,3	g CH ₄ /t (MB)		Papier, cartons, déchets de jardin
He98	6,76	g CH ₄ /kg (MB)	mesures sur site	Déchets verts
IPCC06	4 [0,03-8]	g CH ₄ /kg MB	valeur par défaut [min-max]	Non précisé
	10 [0,08-20]	g CH ₄ /kg MS	valeur par défaut [min-max]	

MB : matière brute, MS : matière sèche

Ces facteurs ont été convertis en carbone équivalent en utilisant le dernier facteur de PRG du méthane de 25 donné par le GIEC, les résultats sont donnés ci-dessous :

Tableau 83: Facteurs d'émissions directes de CH₄ convertis en équivalent carbone (kg éq C/t)

Source	Facteur d'émission en kg éq C/t MB	Méthodologie	Substrat
ADEME05	8.4 [2.1-42.2]	revue bibliographique défaut [min-max]	OM (65% MS)
CITEPA07	6.5	-	biodéchets
ERM06	0.2		Papier, cartons, déchets de jardin
He98	46.1	mesures sur site	Déchets verts
IPCC06	27.3 [0,2-54.5]	défaut [min-max]	Non précisé

La variété des substrats (et de leurs compositions) explique en partie la variance observée sur les facteurs identifiés dans la littérature. Etant donné la très forte variance observée sur les facteurs de la littérature, il apparaît difficile de différencier les émissions par fraction (papiers, cartons, déchets alimentaires) comme il a pu être fait pour les autres filières. BIO recommande donc de sélectionner une valeur unique que l'on suppose valable pour l'ensemble des déchets fermentescibles compostés.

Il est ainsi recommandé d'utiliser la donnée du CITEPA de **7 kg éq C/t** qui est en accord avec les valeurs données par l'ADEME et par le GIEC et qui de plus est déjà utilisée pour réaliser les inventaires nationaux de GES dans le cadre du protocole de Kyoto.

• N₂O

Les mécanismes d'émission de N₂O font l'objet d'une abondante littérature en raison de leur complexité. Cette complexité se reflète dans les facteurs d'émission relevés qui diffèrent de plusieurs ordres de grandeur. Il est à noter que le protoxyde d'azote peut être émis à la fois dans des conditions aérobies et anaérobies.

En conditions aérobies, le N₂O est un sous-produit marginal des processus d'oxydation de l'ammoniac en nitrate (nitrification). Des faibles teneurs en O₂ ou d'importantes concentrations en ammonium (NH₄⁺) peuvent favoriser sa formation.

En conditions anaérobies, le N₂O est produit en quantité variable lors de la réduction des nitrates (NO₃⁻) en diazote (dénitrification). D'importantes concentrations en nitrates peuvent favoriser la génération de N₂O en conditions anaérobies.

Facteurs clés influençant les émissions de N₂O :

- importantes concentrations en nitrates ou plus généralement en composés azotés dans les substrats ;
- faibles teneurs en oxygène.

Méthodologie de calcul des facteurs d'émission :

Aucune méthodologie particulière n'est identifiée, les facteurs résultant de mesures effectuées en laboratoire ou directement sur site.

Tableau 84: Facteurs d'émissions directes de N₂O relevés dans la littérature

Source	Facteur d'émission	Unité	%MS	Méthodologie	Substrat
ADEME05	20 [2-50]	kg eq CO ₂ /t MS	36.7%	Revue bibliographique défaut [min-max]	Biodéchets
	100 [5-125]	kg eq CO ₂ /t MS	65%		OM
Barton02	49	kg eq CO ₂ /t		-	Biodéchets
Beck01	11	g N ₂ O/t MS	65.00%	mesures en réacteurs	Déchets verts
	230	g N ₂ O /t MS	65.00%		
	324	g N ₂ O /t MS	65.00%		
CITEPA07	161	g N ₂ O /t (MB)		-	-
ERM06	165	g N ₂ O /t (MB)			Papier, cartons, déchets de jardin
He98	232	g N ₂ O /t (MB)		mesures sur site	Déchets verts
	247,5	g N ₂ O /t (MB)		mesures en réacteurs	
	382	g N ₂ O /t (MB)			
	1 305	g N ₂ O /t (MB)			
IPCC06	600 [200-1600]	g N ₂ O /t MS		défaut [min-max]	-
	300 [60-600]	g N ₂ O /t MB	60%		

MB : matière brute, MS : matière sèche

Comme effectué précédemment, ces facteurs ont été convertis en équivalent carbone en utilisant le dernier PRG du N₂O fourni par le GIEC, soit 298. L'unique hypothèse effectuée est de considérer qu'en l'absence de précisions dans l'étude, les facteurs se rapportent à une tonne de matière humide de substrat.

Tableau 85: Facteurs d'émissions directes de N₂O convertis en équivalent carbone (kg éq C/t MB)

Source	Facteur d'émission	Méthodologie	Substrat
ADEME05	2.4 [0,2-6.0]	Revue bibliographique défaut [min-max]	Biodéchets
	21.1 [1.1-26.4]		OM
Bar02	15.9	-	Biodéchets
Bec01	0.6	mesures en réacteurs	Déchets verts
	12.2		
	17.1		
CITEPA07	13.1	-	-
ERM06	13.4		Papier, cartons, déchets de jardin
He98	18.9	mesures sur site	Déchets verts
	20.1	mesures en réacteurs	
	31		
	106.1		
IPCC06	24.4 [4.9-48.8]	défaut [min-max]	

La variété des substrats et de leurs compositions explique en partie la variance observée sur les facteurs relevés dans la littérature. Comme précédemment, nous recommandons d'utiliser la valeur donnée par le CITEPA, de **13 kg éq C/t**, supposée valable pour toutes les fractions.

II.6.3.3 EMISSIONS INDIRECTES ET DIRECTES NON DUES AUX DECHETS

Les divers équipements fonctionnant sur un site de compostage tels que les chargeurs, cribieuses ou retourneuses d'andains consomment du carburant et émettent donc des GES. Les émissions indirectes sont essentiellement dues aux consommations d'électricité.

BIO propose d'utiliser le facteur d'émissions indirectes et directes non dues aux déchets du compostage des déchets ménagers et assimilés calculé dans l'étude « Le secteur des déchets ménagers et son rôle dans la lutte contre le changement climatique », réalisée en 2007 pour la FNADE. Ces émissions consolidées au niveau national et ramenées aux tonnages compostés donnent ainsi un facteur d'émission de **5 kg éq C / tonne** que BIO propose d'appliquer à toutes les fractions.

Ce facteur obtenu par une approche de type analyse de cycle de vie tient compte :

- des consommations électriques,
- des consommations de carburant,
- des émissions dues à la production des réactifs et autres consommables,
- de la construction des sites de compostage.

Cette valeur a été calculée en étroite concertation avec les experts de la FNADE.

II.6.3.4 EMISSIONS EVITEES

Deux types d'émissions évitées peuvent être considérés pour le compostage :

- en raison des caractéristiques agronomiques du compost, celui-ci se substitue aux engrais chimiques de synthèse, ce qui permet d'éviter les émissions liées au cycle de vie de ces engrais
- tout le carbone organique du compost ne se transformant pas en CO₂ lorsque celui-ci est épandu, une fraction du carbone peut être considérée comme séquestrée.

- **Substitution aux engrais**

L'étude de Finnveden *et al.*¹ détaille la méthodologie à adopter pour estimer les émissions évitées. Son analyse encourage à distinguer les substituts azotés des substituts phosphorés. Cette approche est celle adoptée par AEA. Les émissions associées à la production de fertilisants inorganiques dans l'étude AEA sont données ci-dessous :

Tableau 86: Emissions évitées liées à la substitution du compost aux fertilisants inorganiques

Fertilisants	Emissions associées à la production (kg eq CO ₂ /kg nutriment)	Contenu en nutriments du compost (kg/t de compost)	Emissions évitées (kg eq CO ₂ /t compost)	Emissions évitées (kg eq C/t compost)
N (acide nitrique)	5.29	6.2	32.8	8.9
P (P ₂ O ₅)	0.52	2	1.0	0.3
K (K ₂ O)	0.38	4.5	1.7	0.5
Total			35.5	9.7

D'après l'étude de l'ADEME « Impacts environnementaux de la gestion biologique des déchets », le rendement du compostage des biodéchets et assimilés des ménages est en moyenne de 30%.

Ainsi pour une tonne de déchet fermentescible envoyée en compostage, les émissions évitées sont de $-9.7 \times 30\% = -3 \text{ kg éq C/t}$

Faute de facteurs fiables, les émissions de N₂O dues à l'épandage des engrais n'ont pas été prises en compte.

- **Substitution aux amendements**

Outre leur valeur fertilisante (apport de nutriments), les composts ont une valeur amendante, améliorant les caractéristiques physiques (porosité, texture, capacité de rétention en eau...) et chimiques (pH) des sols. Aucune étude quantifiant les effets de la substitution du compost à d'autres amendements minéraux ou organiques n'ayant été identifiée, cet aspect n'a pas été traité dans cette étude.

¹ Finnveden G., Johansson J., Lind P., Moberg A. (2000), Life Cycle Assessment of Energy from Solid Waste

- **Séquestration du carbone**

L'étude d'AEA considère le carbone séquestré. En effet, selon leur méthodologie, 92% du carbone (biogénique) contenu dans le compost se minéralise en CO₂ à l'horizon 100 ans, et il y a donc 8% séquestrés. En estimant que le compost contient 180kg C par tonne, cela correspond à -54kg éq CO₂ séquestrés par tonne de compost, soit avec un rendement moyen de 30%, -16 kg eq CO₂ / tonne ou encore **-4 kg éq C /tonne** de déchets putrescibles envoyés en compostage.

II.6.3.5 SYNTHÈSE

La complexité des processus biologiques rend difficile l'estimation des émissions du compostage et il apparaît peu pertinent de proposer un facteur d'émission différencié pour les papiers, les cartons et les déchets alimentaires. En l'absence de données spécifiques fiables et consensuelles, BIO propose d'utiliser les facteurs d'émissions suivants, identiques pour toutes les fractions fermentescibles.

Tableau 87 : Emissions du compostage des déchets fermentescibles (kg éq C/t)

Emissions directes dues aux déchets		Emissions indirectes et directes non dues aux déchets	Emissions évitées		Emissions nettes (hors transport amont)
CH ₄	N ₂ O		Substitution aux engrais	Séquestration	
7	13	5	-3	-4	18 (50%)

Les émissions directes dues aux déchets, et les émissions évitées (substitution aux engrais et séquestration) sont directement dépendantes de processus biologique. L'incertitude liée à ce facteur d'émission est estimée à environ 50%.

II.7 REPARTITION FRANÇAISE ET VALEURS MOYENNES

- **Pourquoi une valeur moyenne ?**

Si les entreprises ou les collectivités connaissent la destination de leurs déchets, elles pourront se référer aux facteurs spécifiques des différents modes de traitement. Dans le cas contraire, un facteur par défaut doit être proposé.

- **Version actuelle : extrapolation des données relatives aux emballages à l'ensemble des déchets**

Le Bilan Carbone® actuel utilise des données ADEME relatives aux emballages pour estimer la répartition de tous les déchets selon les filières de traitement. Le tableau suivant présente les dernières valeurs actualisées obtenues suivant cette méthodologie.

Tableau 88: Répartition des déchets d'emballage selon les filières de traitement (source ADEME/ITOM)

	Enfouissement sans valorisation	Enfouissement avec valorisation	Incineration sans valorisation	Incineration avec valorisation	Recyclage
Acier/Aluminium	32%	14%	0%	1%	53%
Plastiques	32%	15%	2%	36%	15%
Verre	33%	16%	0%	0%	51%

Papiers-cartons	17%	8%	2%	21%	52%
Déchets alimentaires	36%	18%	2%	32%	12%

Les données relatives aux emballages sont alors extrapolées à l'ensemble des déchets constitués de matériaux identiques ou comparables. Ce qui revient à considérer :

- la même répartition pour les différents déchets de métaux (acier, aluminium, cuivre, nickel, zinc plomb) que celle obtenue pour les emballages métalliques,
- la même répartition pour les différents déchets de plastiques que celle obtenue pour les emballages plastiques,
- la même répartition pour les différents déchets de verre et matériaux de construction que celle obtenue pour les emballages en verre
- la même répartition pour les différents déchets papiers-cartons que celle obtenue pour les emballages papiers-cartons.

Cette hypothèse est forte si ces valeurs sont utilisées pour l'ensemble des déchets car les emballages peuvent ne constituer qu'une faible part de certains matériaux et déchets (acier par exemple) et leur répartition entre les divers modes de traitement peut ne pas être représentative de celle des autres déchets de nature "comparable". En revanche, il s'agit d'une hypothèse de répartition plausible pour les déchets collectés avec les ordures ménagères.

Proposer des valeurs plus rigoureuses pour les autres cas supposerait de connaître, pour les différents déchets répartis selon la nomenclature du tableau, d'une part la quantité de déchets produite et d'autre part la répartition de cette production entre les différents modes de gestion. Ces données ne semblent pas disponibles : des données comparables existent pour certains *produits en fin de vie* (DEEE, VHU, pneus, solvants, ...); les données par matériaux (métaux ferreux, papiers, verre, ...) concernent des *taux d'utilisation de matières premières secondaire* mais pas les répartitions entre divers modes de gestion.

Pour ce qui concerne les "déchets alimentaires", l'hypothèse prise ci-dessus est qu'ils se répartissent de la même façon que l'ensemble des déchets ménagers et assimilés compris dans le champ ITOM, hors tri.

• **Autre approche, cas des déchets des entreprises**

En ce qui concerne les déchets des entreprises, une étude de l'ADEME nous fournit la répartition des tonnages selon les filières et les fractions de déchets¹.

Tableau 89: Répartition des déchets d'entreprise selon les filières de traitement (source ADEME)

	Tri	Valorisation matière	Valorisation énergétique	Incinération	Enfouissement	Autre	Inconnu
Verre	18%	69%	1%	0%	5%	0%	6%
Métaux	5%	93%	0%	0%	0%	0%	0%
Plastiques	18%	51%	4%	1%	19%	0%	7%
Caoutchouc	19%	34%	5%	3%	40%	0%	0%
Textile	16%	71%	1%	1%	11%	0%	1%
Papier-carton	31%	60%	1%	1%	2%	3%	2%
Bois	4%	61%	28%	3%	1%	0%	4%
Mélange	26%	13%	11%	3%	33%	0%	14%
Total	16%	52%	12%	2%	11%	1%	6%

Le tri n'étant pas une destination ultime, il convient de ventiler les déchets orientés vers le tri vers les autres filières de traitement. Les flux de déchets recensés dans ITOM 2004² nous fournissent une indication sur la destination finale des déchets qui partent en centre de tri.

¹ ADEME, Enquête sur les déchets des entreprises, 2004

² ITOM, Les installations de traitement des ordures ménagères, 2004

Tableau 90: Destination finale des refus de centres de tri (ITOM2004)

Destination finale des déchets envoyés en centre de tri			
	Quantité (t)		Taux
Matériaux recyclés	4300000		68%
Refus envoyé en centre d'enfouissement	1640000 ¹		26%
Refus incinérés	400000	avec valorisation	6%
		sans valorisation	0%

On peut ainsi, à partir des données du Tableau 89, ventiler les flux de déchets envoyés en centre de tri vers les autres traitements. Nous ne prendrons pas en compte la part des déchets qui vont vers une filière de traitement « autre » ou « inconnue ».

Tableau 91: Destination finale des déchets d'entreprises

	Valorisation matière	Valorisation énergétique	Incinération	Enfouissement
Verre	87%	2%	1%	10%
Métaux	97%	0%	0%	2%
Plastiques	68%	5%	1%	26%
Caoutchouc	46%	6%	3%	45%
Textile	82%	2%	1%	15%
Papier-carton	83%	3%	1%	11%
Bois	66%	29%	3%	2%
Mélange	35%	15%	4%	46%
Total	67%	14%	2%	16%

Cette approche présente également des limites certaines puisque d'une part elle néglige deux catégories, et d'autre part les déchets des entreprises orientés vers le tri sont ventilés vers les filières de traitement ultime comme s'il s'agissait d'ordures ménagères. Il est en effet probable que les taux de refus soient plus faibles en supposant que les flux soient plus homogènes.

Les résultats prochains de la campagne MODECOM devraient permettre de proposer des chiffres beaucoup plus fiables sur les destinations finales des déchets des entreprises et des particuliers.

- **Autre approche, cas des ordures ménagères**

L'étude de l'ADEME sur la collecte des ordures ménagères en 2005 indique la répartition des ordures résiduelles et déchets collectés sélectivement selon les différentes filières de traitement.

Tableau 92: Répartition des ordures ménagères selon les filières de traitement (source ITOM 2005)

Type de déchets	Recyclage	Incinération sans valorisation énergétique	Incinération avec valorisation énergétique	Méthanisation	Compostage	Enfouissement
Verre collecté sélective	100%	0%	0%	0%	0%	0%
Déchets verts collectés sélective	0%	3%	0%	2%	94%	1%
Ordures ménagères résiduelles	1%	4%	51%	0%	3%	41%

¹ NB: le tonnage des refus envoyés en centre d'enfouissement a été augmenté pour satisfaire le bilan de masse

Matériaux recyclables collectés sélectivement	100% ¹	0%	0%	0%	0%	0%
Total OM	18%	3%	42%	0%	3%	34%

II.8 SYNTHÈSE

II.8.1 RECYCLAGE

Tableau 93 : Récapitulatif des facteurs d'émissions proposés pour l'actualisation du guide (kg éq C/t)

Matières de base proposées dans le Bilan Carbone® et émissions évitées ²	Sources répertoriées dans le guide des facteurs d'émissions	Ancien Facteur	Nouveau Facteur	Sources des nouveaux facteurs	Facteurs de caractérisation utilisés
Acier ou fer blanc neuf (produits plats)	OFEFP	870	870	OFEFP	IPCC 2007
Acier ou fer blanc recyclé 100%	OFEFP	300	300	OFEFP	IPCC 2007
Aluminium neuf	OFEFP	2890	2680	IAI07	
Aluminium recyclé 100%	OFEFP	670	140	EAA08	
Polyéthylène haute densité neuf	PlasticsEurope 1999	500	520	PlasticsEurope 2005-2007	IPCC 2007
Polyéthylène haute densité recyclé 100%	USEPA98	250	55	USEPA06	
Polyéthylène basse densité neuf	PlasticsEurope 1999	550	570	PlasticsEurope 2005-2007	IPCC 2007
Polyéthylène basse densité recyclé 100%	USEPA98	230	55	USEPA06	
PET neuf	PlasticsEurope 1999	1200	890	PlasticsEurope 2005-2007	IPCC 2007
PET recyclé 100%	USEPA98	400	55	USEPA06	
PVC neuf	PlasticsEurope 1999	520	515	PlasticsEurope 2005-2007	IPCC 2007
PVC recyclé 100%		110	110		
Verre plat	MIES99	414	414	EcolInvent	IPCC 2007
Verre recyclé 100%	OFEFP	165	165	OFEFP	IPCC 2007
Verre d'emballage 100% vierge	OFEFP	280	280	OFEFP	IPCC 2007
Papier	USEPA98	550	360	EcolInvent	IPCC 2007

¹ La part de matériaux recyclables collectés séparément et recyclés n'est pas indiquée explicitement dans la synthèse du rapport ITOM 2005. En revanche, le verre et les matériaux recyclables collectés séparément représentent 17% du total des OM. Or l'ITOM 2005 indique que 18% des OM sont recyclées. On en déduit que 100% du verre et des matériaux recyclables sont recyclés.

² Les émissions évitées par les filières matériaux recyclés sont calculées comme la différence entre les facteurs d'émission 100% vierge et 100% recyclé. L'évolution méthodologique que cela représente par rapport au Bilan Carbone® actuel, et les précautions à prendre pour leur utilisation et leur communication sont discutées en partie 3 du présent rapport.

Matières de base proposées dans le Bilan Carbone® et émissions évitées ²	Sources répertoriées dans le guide des facteurs d'émissions	Ancien Facteur	Nouveau Facteur	Sources des nouveaux facteurs	Facteurs de caractérisation utilisés
Carton	USEPA98	500	290	EcoInvent	IPCC 2007

- **Axes d'amélioration complémentaires**

- Intégration du recyclage des DEEE (nécessité de refonte méthodologique pour intégrer les procédés en boucle ouverte)
- Intégration des taux de substitution matière vierge/matière recyclée
- Prise en compte de données actualisées pour le recyclage des papier/carton

II.8.2 INCINERATION

Tableau 94: Synthèse des améliorations : Facteurs d'émissions par défaut pour l'incinération Emissions (kg éqC/t)

Emissions de l'incinération (kg éq C /t)		Directes		Indirectes et directes non dues aux déchets*	Evitées		
		CO ₂	N ₂ O*		Valorisation électrique	Valorisation thermique	Cogénération
Déchets inertes			-	5*	-		
Déchets fermentescibles combustibles (papiers, cartons, déchets alimentaires)	papiers	-	3*	5*	-20	-172	-168
	cartons	-	3*	5*	-22	-187	-182
	déchets alimentaires	-	3*	5*	-7	-63	-61
Déchets non fermentescibles combustibles (plastiques)	LDPE/HDPE	838	-	5*	-58	-496	-483
	PET	617	-	5*	-32	-268	-262
OM		70	3*	5*	-10	-86	-84
DIS		173*	10*	5*	-		
DASRI		245*	5*	5*	-		

	Non comptabilisé dans la méthode actuelle
	Comptabilisation par approche méthodologique
	* Facteur d'émission de la littérature

Tableau 95 : Comparaison des émissions nettes de l'incinération avec la méthode Bilan Carbone® actuelle

Emissions nettes en kg éq C/t (hors transport amont)		Valeur actuelle	Actualisation proposée	Valeur actuelle	Actualisation proposée	Complément proposé	
		Sans valorisation		Valorisation électrique		Valorisation thermique	Cogénération
Déchets inertes		0	5	0	5	5	5
Déchets fermentescibles combustibles (papiers, cartons, déchets alimentaires)	papiers	0	8	-26	-12	-164	-160
	cartons	0	8	-27	-14	-179	-174
	déchets alimentaires	0	8	-9	1	-55	-53
Déchets non fermentescibles combustibles (plastiques)	LDPE/HDPE	470	843	397	785	347	360
	PET		622		590	354	360
OM		-	78	-	68	-8	-6
DIS		-	188	-	-	-	-
DASRI		-	255	-	-	-	-

- **Méthodologies clés et paramètres utilisés**

Emissions directes de carbone fossile :

$$FE_c = \%C_m \times \%C_f \times Ox \times 1000$$

Avec

FE_c : Facteur d'émissions directes de carbone fossile (en kg éq C/t)

%C : Contenu massique de carbone dans le déchet incinéré (en %)

%C_f : Part de carbone fossile (en % du carbone total)

Ox : Taux d'oxydation (en %)

En l'absence de données spécifiques, l'entité réalisant le Bilan Carbone® de l'incinération d'un déchet peut utiliser un taux d'oxydation de 98%, valeur déjà utilisée dans pour proposer des facteurs par défaut.

Emissions évitées par la valorisation thermique :

$$FE_{\text{évitées}} = PCI \times [\Phi_{\text{elec}} \times FE_{\text{elec}} + \Phi_{\text{therm}} \times FE_{\text{therm}}]$$

Avec

- PCI: Pouvoir calorifique de la fraction
- Φ_{elec} : efficacité de conversion de l'énergie calorifique en énergie électrique valorisée, ie vendue ou autoconsommée (0 pour les incinérateurs avec valorisation thermique seule)
- Φ_{therm} : efficacité de conversion de l'énergie calorifique en énergie thermique valorisée, ie vendue ou autoconsommée (0 pour les incinérateurs avec valorisation électrique seule)
- FE_{elec}: contenu en GES du kwh électrique évité (23g éq C/kwh, voir 0)
- FE_{therm} : contenu en GES du kwh thermique évité (à adapter au contexte local)

Les facteurs proposés par défaut en l'absence de données spécifiques sont les suivants :

	Valorisation thermique seule	Valorisation électrique seule	Cogénération
Φ _{elec}	n/a	21%	12%
FE _{elec}	n/a	- 23 g éq C/kWh	- 23 g éq C/kWh
Φ _{therm}	54%	n/a	49%
FE _{therm}	-76 g éq C/kWh*	n/a	-76 g éq C/kWh*

*voir 0

- **Axes d'améliorations complémentaires**

- besoins complémentaires en données pour l'incinération des déchets dangereux et des DAS
- actualisation des PCI des fractions (MODECOM)
- intégration dans l'outil Bilan Carbone® des méthodologies clés, permettant ainsi à l'entité d'intégrer des déchets non proposés par défaut

II.8.3 ENFOUISSEMENT

Tableau 96: Comparaison des facteurs actualisés avec ceux de la méthode Bilan Carbone actuelle

Emissions nettes (kg éq C par tonne de déchets enfouie (hors transport amont))	Sans captage		Captage et valorisation				Centre d'enfouissement avec torchage	Moyenne française
	Bilan Carbone®	Actualisation	Bilan Carbone®	Actualisation: Electrique	Actualisation: Cogénération	Actualisation: Thermique	Actualisation	Actualisation
Papier	400	746	-52	22	-14	-39	30	-24
Carton	200	720	-36	-12	-47	-70	-4	-10
Déchets alimentaires	290	466	-37	103	80	65	108	104
DIS	125	34	-	-	-	-	-	-
OM ¹	-	321	-	34	18	8	37	35

- **Méthodologies clés et paramètres utilisés**

Emissions de méthane et séquestration :

La méthodologie proposée se base sur le bilan de masse suivant :

$$COB_i = \frac{C_{CH_4}}{F_{CH_4}} + COB_{seq}$$

Avec

COB_i : carbone organique biodégradable initial

C_{CH_4} : carbone dégradé sous forme de méthane

F_{CH_4} : part de méthane dans le gaz émis par le centre d'enfouissement

COB_{seq} : carbone organique biodégradable séquestré

Ceci permet de ramener le calcul des émissions de méthane et la séquestration à la connaissance de trois facteurs clés :

- le taux de carbone organique biodégradable dans le déchet enfoui
- la fraction de ce carbone biodégradable effectivement décomposée en méthane lors de l'enfouissement (taux de méthanisation)
- le taux de méthane dans le biogaz émis par le centre d'enfouissement

Les valeurs retenues à partir de l'analyse des publications sont les suivantes :

¹ Sur la base de la composition des ordures ménagères indiquée dans le MODECOM 1993

Tableau 97: Paramètres clés retenus pour les facteurs d'émissions par défaut

Fraction de déchets	Taux de Carbone Organique Biodégradable dans le matériau	Taux de méthanisation (par rapport au COB initial)	Taux de CH4 dans le gaz	Carbone séquestré par tonne de déchet (kg éq C /tonne)	Emissions brutes de méthane (kg éq C / tonne)
Papier	38%	24%	50%	198	829
Carton	40%	22%	50%	224	800
Déchets alimentaires	15%	38%	50%	36	518
OM	14%	28%	50%	63	

Facteurs clés retenus
Facteurs calculés

Facteurs d'émissions finaux et valorisation énergétique :

Le facteur d'émission final prend en compte **10%** d'oxydation en surface et un taux de captage par défaut de **70%**. Outre les émissions de méthane dues à la décomposition, sont prises en compte les émissions indirectes et directes non dues à la décomposition, à hauteur de **4 kg éq CO₂ par tonne** de déchets.

Les émissions évitées par valorisation sont calculées de la manière suivante :

$$E_{\text{évitée}} = M_{\text{CH}_4} \times PCI_{\text{CH}_4} \times [\phi_{\text{elec}} \times FE_{\text{elec}} + \phi_{\text{therm}} \times FE_{\text{therm}}]$$

Avec

M_{CH_4} = masse de CH₄ captée et valorisée

PCI_{CH_4} = 13.9 kWh/kg

$E_{\text{remplacée}}$ = facteur d'émission du kWh remplacé

ϕ_{elec} = Efficacité de conversion électrique

FE_{elec} = Facteur d'émission associé au mix électrique

ϕ_{therm} = Efficacité de conversion thermique

FE_{therm} = Facteur d'émission associé au mix thermique

Les facteurs proposés par défaut en l'absence de données spécifiques sont les suivants :

	Valorisation thermique seule	Valorisation électrique seule	Cogénération
ϕ_{elec}	n/a	33%	33%
FE_{elec}	n/a	- 23 g éq C/kWh	- 23 g éq C/kWh
ϕ_{therm}	85%	n/a	45%
FE_{therm}	-76 g éq C/ kWh*	n/a	-76 g éq C/kWh*

*voir 0

- **Axes d'améliorations complémentaires**

- Prise en compte du décalage temporel entre l'enfouissement et les émissions de méthane (adaptation du contenu carbone du mix énergétique et de l'efficacité des technologies de captage et de valorisation sur la base d'études prospectives).

- Intégration de fractions de déchets fermentescibles supplémentaires (bois, textile,...).

II.8.4 TRAITEMENTS BIOLOGIQUES

II.8.4.1 COMPOSTAGE

Tableau 98 : Synthèse des émissions pour le compostage (toute fraction fermentescible, kg éq C/t)

Emissions directes dues aux déchets		Emissions indirectes et directes non dues aux déchets	Emissions évitées		Emissions nettes (hors transport amont)
CH ₄	N ₂ O		Substitution aux engrais	Séquestration	
7	13	5	-3	-4	18

II.8.4.2 METHANISATION

Tableau 99 : Synthèse des émissions moyennes pour la méthanisation (kg éq C/tonne)

Emissions directes dues aux déchets	Emissions directes et indirecte non dues aux déchets	Emissions évitées		Total
		Substitution aux engrais	Valorisation énergétique	
2	2	-9	-12	-17

II.8.5 COLLECTE ET TRANSPORTS AMONTS

Tableau 100 : Emissions amonts dues à la collecte et aux transports (kg éq C/t)

Emissions (kg éq C/t)	Collecte sélective ou en mélange avec les OM (ménages et petites entreprises)	Trajet direct (grande entreprises)	Bilan Carbone®
Fractions recyclables	10	5	4
DIS	n/a	5	
DAS	n/a	5	
Autres fractions	5	2	

III PHASE 3 : REFLEXION METHODOLOGIQUE, APPROPRIATION DE LA METHODE BILAN CARBONE® PAR LES INDUSTRIELS DU TRAITEMENT DES DECHETS

La section déchets de la méthode Bilan Carbone® ne s'applique pas spécifiquement à des activités de traitement de déchets, mais plutôt à la gestion des déchets d'autres activités.

L'objectif de cette section est d'entamer une réflexion sur l'appropriation de la méthode Bilan Carbone® par les industriels du traitement des déchets.

Les différentes entités concernées sont :

- les installations de tri et recyclage,
- les unités d'incinération des ordures ménagères,
- les centres de stockage des déchets,
- les centres de compostage des déchets,
- les centres de méthanisation des déchets.

L'objectif de cette partie n'est pas de proposer un guide opérationnel Bilan Carbone® à destination des acteurs des déchets mais d'identifier les difficultés méthodologiques que peut poser la méthode et de proposer des pistes de solutions ou d'évolution de la méthode Bilan Carbone® pour les résoudre.

La phase 3 vise ainsi à donner des clés de lecture et d'application de la méthode adaptées aux spécificités du secteur.

III.1 SPECIFICITES DES METIERS DU DECHET ET PRINCIPES DE LA METHODE BILAN CARBONE®

III.1.1 RAPPEL DES OBJECTIFS ET PRINCIPES DE LA METHODE BILAN CARBONE®

La méthode « Bilan Carbone® » a pour objectif de permettre à toute activité industrielle ou tertiaire d'estimer les émissions de gaz à effet de serre (GES) qui résultent des processus physiques nécessaires à son existence, où que ces processus aient lieu. La méthode repose sur l'utilisation de **facteurs d'émission** pour permettre de convertir des données d'activités en émissions estimées de GES. La finalité de cette méthode **n'est pas d'aboutir à une quantification précise** mais de permettre **l'identification en ordre de grandeur des postes les plus impactants** pour **faciliter la mise en place d'une démarche de progrès**. En effet, la méthode « *se veut avant tout un tremplin vers des actions de réduction des émissions de gaz à effet de serre* »¹.

La question de l'applicabilité de la méthode Bilan Carbone® à une activité de traitement des déchets revient donc à s'assurer **que la méthode permet d'identifier et d'intégrer tous les leviers d'amélioration propres à ces métiers, mais aussi qu'elle offre toutes des clés de calculs et d'interprétation**.

Sur ces principes, un aperçu rapide de quelques spécificités du métier des déchets montre que les facteurs de la section déchets du guide ne suffisent pas à réaliser le Bilan Carbone® d'une installation de traitement. Deux exemples pour illustrer ce propos:

¹ Guide méthodologique - version 5.0 -objectifs et principes de comptabilisation, p. 11/109 Janvier 2007, ADEME.

- Une unité d'incinération peut produire de l'électricité et/ou de la chaleur lorsqu'elle traite les déchets. Cette activité évite ainsi les émissions liées à la production alternative de ces mêmes quantités de chaleur ou d'énergie. En jouant sur les rendements énergétiques, l'entité dispose ici d'un levier d'amélioration non pris en compte dans la méthode actuelle. De même, le compost produit par un centre de compostage peut se substituer en partie à des fertilisants chimiques, et éviter des émissions de GES. Il s'agit également de leviers non identifiables par la méthode dans sa forme actuelle. Une réflexion sur la prise en compte de la valorisation matière et énergie est donc nécessaire.
- Plus généralement, les déchets peuvent être sources directes d'émissions de GES, et la frontière entre paramètres endogènes et exogènes d'un système de gestion des déchets peut être délicate. Au vu de ces spécificités, des clés de lecture particulières de la méthode Bilan Carbone® sont nécessaires.

L'objectif de cette section **n'est pas de proposer un guide clé en main d'application de la méthode Bilan Carbone®** à une activité de traitement des déchets mais d'identifier les difficultés méthodologiques susceptibles de survenir lors de l'application de la méthode Bilan Carbone® à une activité de traitement des déchets, de proposer des pistes de solutions ou d'évolution de la méthode Bilan Carbone, et plus généralement d'offrir des clés de lecture adaptées aux spécificités du secteur.

III.1.2 POURQUOI UNE LECTURE PARTICULIERE DE LA METHODE EST-ELLE JUSTIFIEE ?

- **Valorisation des déchets**

La valorisation est un concept spécifique à l'activité de traitement des déchets. Partant du principe que la fonction principale d'une installation de traitement est d'éliminer les déchets, l'énergie produite ou les matériaux recyclés sont des « sous-produits » de ce traitement qui permettent d'éviter l'extraction de matière première ou la production d'énergie par d'autres moyens conventionnels plus émetteurs. La conséquence indirecte de cette valorisation est – la plupart du temps – une réduction des émissions de gaz à effet de serre pour la collectivité. Ce poste d'émissions, dites évitées, doit pouvoir être évalué lorsque l'on effectue le Bilan Carbone® d'une entreprise de traitement. Les questions que soulève la prise en compte des émissions évitées sont abordées en III.2.3.

- **Différents niveaux d'interprétation**

Pour plusieurs activités de traitement des déchets, de nombreuses émissions directes sont directement corrélées **à la composition des déchets entrants**. On peut citer ainsi :

- Les émissions de CH₄ des sites d'enfouissement (liées au carbone organique biodégradable des déchets)
- Les émissions de CO₂ ou de N₂O de l'incinération
- Les émissions de CH₄ ou de N₂O du compostage
- ...

Il ressort de ce constat **qu'une lecture particulière et une interprétation adaptée** sont nécessaires afin d'appréhender les variations d'un Bilan Carbone® réalisé d'une année sur l'autre, variations qui peuvent être le fait de paramètres complètement exogènes au système étudié. Par exemple, un site d'incinération qui recevrait des déchets de plus fort PCI d'une année sur l'autre peut générer davantage d'électricité ou de chaleur sans avoir pour autant amélioré ses performances intrinsèques de valorisation énergétique.

Il est nécessaire d'avoir en tête ces considérations lors de l'interprétation du Bilan Carbone® d'une activité de traitement des déchets. Des pistes de réflexions pour limiter ces facteurs de variabilité sont discutées en III.2.1.2.

- **Différents niveaux d'action**

Les leviers d'amélioration peuvent être différents en fonction de l'entité considérée. Une collectivité réalisant le Bilan Carbone® de son système de traitement des déchets peut par exemple influencer sur la composition des déchets entrants dans les différentes entités de traitement (par exemple

en mettant en place une collecte sélective) ; à l'inverse, un exploitant de centre d'enfouissement n'a généralement pas de prises sur la composition des déchets entrants.

- **Des flux de natures différentes**

Plus généralement, l'application de la méthode Bilan Carbone® à des métiers du déchet **peut s'avérer délicate en raison de flux entrants et sortants du système** de natures très différentes : déchets, matières premières, énergies, matière secondaire... Ces flux nécessitent d'être intégrés dans le Bilan Carbone® avec cohérence et rigueur, ce qui requiert des instructions précises.

- **Différentes perspectives temporelles**

Qu'ils s'agissent des émissions de méthane des centres de stockage, ou de la séquestration (cf I.3.1.2), la quantification de ces émissions nécessite de prendre en considération des perspectives temporelles. Par exemple, dans le cas du centre de stockage, les déchets enfouis l'année N vont continuer d'émettre sur de très longues périodes. Une question que l'on peut se poser est de savoir si l'on doit quantifier les émissions des déchets enfouis l'année N ou bien les émissions dues aux déchets enfouis les années auparavant ?

Ces aspects sont propres à certains métiers du déchet, comme le compostage (et indirectement la méthanisation dans le cas où le digestat est composté) ou le centre de stockage.

III.1.3 QUELS SONT LES PARAMETRES CRITIQUES ISSUS DES APPROCHES ACV ?

L'Analyse de cycle de vie est une méthodologie de quantification des impacts environnementaux d'un service ou d'un produit tout au long de son cycle de vie. Normalisée, c'est une approche multi-étapes et multi-critères. En ce sens, la méthode Bilan Carbone® est inspirée de l'ACV mais se restreint à l'évaluation du bilan effet de serre. L'analyse et les recommandations des chapitres qui suivent s'appuient sur les méthodologies d'analyse de cycle de vie.

L'objectif de cette section est d'identifier les paramètres les plus sensibles pour l'estimation des émissions de GES des filières de traitement des déchets. Ces points critiques nécessitent donc une attention particulière lorsqu'un Bilan Carbone® relatif à une filière de traitement de déchets est effectué.

La compilation des paramètres clés qui suivent est issue de l'étude « Déchets ménagers : leviers d'améliorations des impacts environnementaux. », menée conjointement par BIO Intelligence Service et Ecobilan en 2000 pour l'ADEME et Eco-emballages. Dans un premier temps cette étude a permis l'identification des paramètres techniques et de leur fourchette de variation pour chaque étape du système de gestion des déchets (collecte, transport, tri-recyclage, incinération, stockage en décharge, traitement biologique). Ceci a permis de définir un ensemble de paramètres sensibles du point de vue des impacts environnementaux.

- **L'enfouissement des déchets**

Paramètres sensibles	Influence sur le Bilan Carbone®	Donnée(s) accessible(s) à l'exploitant
Composition du gisement enfoui	Emissions de biogaz	Oui : si une caractérisation des déchets a été effectuée
Taux de captage du biogaz		Difficilement accessible, seul le biogaz capté est appréciable.
Valorisation du biogaz capté	Calcul des émissions évitées à partir des quantités d'énergie électrique/thermique vendues	Oui
Type d'énergie substitué pour la production de chaleur et facteur d'émission associé		Oui
Composition du kWh électrique substitué		n/a (Paramètre)

- **L'incinération**

Paramètres sensibles	Influence sur le Bilan Carbone®	Donnée(s) accessible(s) à l'exploitant
Composition des OM	Part des émissions de CO ₂ d'origine fossile en sortie de cheminée	Oui : si une caractérisation des déchets a été effectuée
Taux de valorisation des mâchefers, ferrailles, aluminium	Emissions évitées par le recyclage	Oui
Procédé d'épuration des fumées	Emissions de CO ₂ dues à la production/acheminement des consommables	Oui : Quantité de consommables Non : Facteur d'émission pour la production et l'acheminement des consommables (soude, chaux, charbon actif,...)
Performances de valorisation énergétique	Calcul des émissions évitées à partir des quantités d'énergie électrique/thermique vendues	Oui
Type d'énergie substitué pour la production de chaleur et facteur d'émission associé		Oui
Composition du kWh électrique substitué		n/a (Paramètre)

Remarque : les transports des sous-produits et des déchets du site ont un impact mineur sur le bilan GES.

- **Le compostage**

Paramètres sensibles	Influence sur le Bilan Carbone®	Donnée(s) accessible(s) à l'exploitant
Rejets atmosphériques	Emissions directes de méthane, N ₂ O (le CO ₂ d'origine biomasse n'est pas comptabilisé)	Difficilement accessibles
Devenir des refus de tri	Impact de l'incinération ou de l'enfouissement des refus	Oui
Composition NPK Taux de lessivage des NPK du compost après épandage	Impacts évités par la substitution aux engrais inorganiques	Oui : composition NPK (analyse)

Remarque : Le type d'énergie consommé sur le site (électricité ou fuel) a peu d'impact sur le bilan GES en raison des faibles quantités utilisées.

- **La méthanisation**

Paramètres sensibles	Influence sur le Bilan Carbone®	Donnée(s) accessible(s) à l'exploitant
Devenir des refus de tri	Impact de l'incinération ou de l'enfouissement des refus	Oui
Taux de fuite du biogaz	Emissions directes de méthane	Difficilement accessibles
Performances de valorisation énergétique	Calcul des émissions évitées à partir des quantités d'énergie produite	Oui
Type d'énergie substitué pour la production de chaleur et facteur d'émission associé		Oui
Composition du kWh électrique substitué		n/a (Paramètre)

- **Tri/recyclage**

L'étude ADEME 2000 ne soulève pas de points particuliers sur ces modules, le tableau qui suit résulte de l'expertise de BIO sur ces filières :

Paramètres sensibles	Influence sur le Bilan Carbone®	Donnée(s) accessible(s) à l'exploitant
Devenir des refus de tri	Impact de l'incinération ou de l'enfouissement des refus	Oui
Type de matériau vierge substitué par la production de matière secondaire	Calcul des émissions évitées par la substitution	Oui

- **Synthèse**

Pour toutes les filières, les points suivants apparaissent comme étant les plus critiques :

- l'intégration des émissions évitées (compost, énergie, recyclage). Le calcul des émissions évitées par la valorisation énergétique est par ailleurs un enjeu majeur récurrent pour toutes les filières avec valorisation ;
- la composition du gisement, qui influence fortement les émissions directes dues aux déchets ;
- les rejets atmosphériques du compostage.

Ces points sont discutés dans les chapitres qui suivent.

III.2 DIFFICULTES METHODOLOGIQUES ET PRECONISATIONS POUR LES INDUSTRIELS DU DECHET

III.2.1 POSTES GENERIQUES ET PRECONISATIONS POUR TOUTES ACTIVITES DE TRAITEMENT

III.2.1.1 RAPPEL DES POSTES SANS DIFFICULTES

La méthode du Bilan Carbone® inclut l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre, qu'elles soient directes, comme les émissions liées à l'utilisation d'énergie au sein de l'entité, ou indirectes, comme les émissions liées à la production des entrants.

Les émissions reliées à tous les « processus physiques nécessaires » au fonctionnement de l'entité doivent être prises en compte dans le bilan global. Les différents postes d'émission considérés dans la méthode Bilan Carbone®, sont les suivants :

- Utilisation de l'énergie au sein de l'entité
- Emissions des procédés industriels ou agricoles (autres que résultant de l'usage de l'énergie)
- Energie et procédés pour les sous-traitants
- Fret
- Transport des personnes
- Matériaux entrants et services tertiaires
- Déchets directs et eaux usées
- Emballages des produits vendus ou distribués
- Amortissement des immobilisations
- Prise en compte de l'utilisation des produits ou services mis sur le marché
- Prise en compte des émissions de fin de vie des produits mis sur le marché

Concernant les postes transport des personnes, amortissement des immobilisations, fret, emballages des produits vendus ou distribués et énergie et procédés pour les sous-traitants, l'application de la méthode Bilan Carbone® à une installation de traitement **ne pose pas de difficultés particulières**, ce sont des postes communs à toutes les entités et **indépendants des spécificités des entreprises de traitement des déchets**.

Il convient d'aborder le Bilan Carbone® d'une installation de traitement des déchets comme une activité à part entière.

III.2.1.2 QUELLE PRISE EN COMPTE DES FLUX ENTRANTS ET SORTANTS DE DECHETS (« MATERIAUX ENTRANTS ET SERVICES TERTIAIRES », « DECHETS DIRECTS ET EAUX USEES »)?

III.2.1.2.a Déchets entrants

Concernant les divers matériaux entrants et substances nécessaires au fonctionnement de l'entité utilisés dans les procédés de traitement (réactifs...), ce poste ne pose aucune difficulté.

On peut néanmoins s'interroger sur la prise en compte du flux de déchets : doit-on affecter à celui-ci des émissions causées par l'ensemble des étapes amont du cycle de vie du déchet ?

Le guide méthodologique (Version 5, janvier 2007) est très clair sur ce point et stipule **qu'il faut exclure ce poste du bilan global** : « la prise en compte des flux entrants suppose que l'entité « bénéficie » de processus qui se sont passés ailleurs et qui ont conduit à des émissions de gaz à effet de serre [...] il est en effet « discutable de considérer que le gestionnaire de déchets est un

bénéficiaire de la fabrication des déchets en question, et de lui imputer dans son Bilan Carbone® les émissions liées à la fabrication des déchets qu'il gère »¹.

La différenciation entre flux de déchets et substances nécessaires au fonctionnement de l'entité peut parfois être ténue. On peut citer par exemple le cas d'une entité utilisant une chaudière fonctionnant aux papiers de récupération, ou plus généralement un centre de recyclage recevant des ferrailles.

Il est possible de s'appuyer sur la directive cadre européenne 2008/98/CE du 18 Novembre 2008, qui définit comme déchet : « *toute substance ou tout objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire* ».

La directive éclaircit en outre la fin du statut de déchet :

« *Certains déchets cessent d'être des déchets lorsqu'ils ont subi une opération de valorisation ou de recyclage et répondent à des critères spécifiques à définir dans le respect des conditions suivantes:*

- a) *la substance ou l'objet est couramment utilisé à des fins spécifiques;*
- b) *il existe un marché ou une demande pour une telle substance ou un tel objet;*
- c) *la substance ou l'objet remplit les exigences techniques aux fins spécifiques et respecte la législation et les normes applicables aux produits; et*
- d) *l'utilisation de la substance ou de l'objet n'aura pas d'effets globaux nocifs pour l'environnement ou la santé humaine. »*

Dès lors que l'entité remplit une fonction voulue de traitement/élimination/récupération d'un flux entrant de déchets, les émissions liées à **la production** de ce flux ne devront pas être considérées. En revanche, toutes les étapes, depuis la génération du déchet jusqu'à son traitement/sa valorisation doivent être prises en compte (transport, tri, ...).

III.2.1.2.b Déchets sortants

Comme pour toutes activités, les émissions dues aux déchets orientés vers une autre filière de traitement que celle effectuant son Bilan Carbone® sont à prendre en compte (ex : refus de tri d'un site de compostage) à l'aide des facteurs d'émissions actualisés de la section déchets.

Il conviendra d'utiliser les facteurs d'émissions hors transport amont pour éviter tout double comptage.

Conformément aux recommandations du Bilan Carbone®, nous proposons d'exclure du bilan les émissions dues à la production des déchets. En revanche, il est nécessaire d'intégrer les émissions des processus amonts qui ont rendu possible à l'exploitant l'élimination ou la valorisation du déchet (tri, transport,...)

Les émissions dues aux autres matériaux entrants (réactifs...) doivent cependant être prises en compte dans le Bilan Carbone® de l'entité, comme le ferait n'importe quelle entreprise.

III.2.1.1 TRANSPORT DES DECHETS (« FRET »)

Des facteurs d'émissions génériques sont présentés dans le cadre de l'actualisation de la section déchet du guide (cf II.6.1). En l'absence de données plus précises, il conviendra donc d'utiliser ces facteurs par défaut. Si l'entité dispose de données plus fines sur ces aspects (caractéristiques des flottes, distances, kilomètre parcourus,...), des facteurs plus fins peuvent être calculés à l'aide de la section transport du guide méthodologique Bilan Carbone®.

Ces émissions pourraient venir enrichir le poste « Fret » de la méthode Bilan Carbone®.

¹ Guide méthodologique - version 5.0 -objectifs et principes de comptabilisation, p. 28/109, Janvier 2007, ADEME.

III.2.1.2 LA COMPOSITION DES DECHETS : POURQUOI CONSIDERER LA COMPOSITION DES DECHETS ENTRANTS COMME UN PARAMETRE FIXE ?

La composition des déchets traités est un paramètre important pour plusieurs raisons :

- Dans certains cas d'application, ce peut être un levier d'amélioration (aspect qualitatif).
 - o Par exemple, une collectivité peut mettre en place une collecte sélective et influencer ainsi sur la composition des déchets entrant en site d'enfouissement.
 - o A l'inverse, une installation de traitement ne maîtrise pas forcément ce paramètre et n'y a même parfois pas accès.
- C'est un paramètre qui influe fortement sur le bilan GES des installations (aspect quantitatif) :
 - o De nombreuses émissions directes sont directement liées à la composition des déchets entrants et à leurs caractéristiques. On peut citer par exemple les émissions de CO₂ de l'incinération ou de méthane d'un centre d'enfouissement.
 - o Les caractéristiques des déchets influent sur les quantités d'énergie produites par les installations avec valorisation (via le PCI pour un incinérateur, via le potentiel méthanogène pour un CET,...).
 - o La qualité d'un compost dépend des déchets traités.
 - o ...

Lorsqu'une entité de traitement des déchets effectue son Bilan Carbone®, la composition des déchets a une influence certaine sur les émissions de GES de l'installation, et une modification de la composition d'une année à l'autre peut améliorer ou détériorer le Bilan Carbone® de l'entreprise sans que de réelles améliorations/détériorations intrinsèques aient eu lieu. En utilisant des compositions/caractéristiques des déchets différentes d'une année sur l'autre, on renforce le caractère exogène de ce paramètre.

Afin de **limiter les variations non liées à une amélioration intrinsèque de l'exploitation et dans une perspective d'uniformisation** de l'application de la méthode Bilan Carbone®, il apparaît souhaitable de **proposer par défaut des compositions/caractéristiques pour les déchets** afin de guider la réalisation de Bilan Carbone®.

Une possibilité serait par exemple de **proposer quatre jeux de données différenciés par milieu (national, urbain, semi-urbain, rural)**, en utilisant les dernières **données MODECOM** actuellement en cours de compilation. A titre informatif, le MODECOM 93 donne les compositions suivantes :

CATÉGORIE	PROVINCE				SYCTOM de Paris (%)	MOYENNE NATIONALE DE RÉFÉRENCE	C sur brut (%sur brut dans chacune des fractions)
	Urbain (%)	Semi-urbain (%)	Rural (%)	Ensemble (%)			
Déchets putrescibles	26,8	31,5	32,2	29,8	17,3	28,7	15%
Papiers	17,8	13,6	14,7	15,5	23	16,2	32%
Cartons	9,6	8,3	8,6	8,9	13,1	9,3	28%
Complexes	1,5	1,3	1,6	1,5	0,9	1,4	37%
Textiles	2,2	2,6	2,3	2,4	4,9	2,6	39%
Textiles sanitaires	3	3,3	3,2	3,2	2,1	3,1	20%
Plastiques	11,2	10,5	11,3	10,9	12,8	11,1	50%
Combustibles non classés	3,5	2,9	2,6	3,1	5,3	3,3	37%
Verres	13,3	13,4	12,3	13,1	12,6	13,1	0%
Métaux	4	4,1	4,4	4,1	3,6	4,1	0%

Incombustibles non classés	6,4	8,1	6,2	7	4,4	6,8	2%
Déchets ménagers spéciaux	0,7	0,4	0,5	0,5	0	0,5	0%

Par défaut et sauf si la situation locale le justifie, l'entité se basera sur ces compositions/caractéristiques moyennes.

Nous recommandons de considérer par défaut la composition et les caractéristiques (PCI, carbone fossile, potentiel méthanogène) des déchets comme des données fixées, communes à toutes les installations, et basées sur les données MODECOM.

Un raffinement envisageable consisterait à définir des compositions moyennes selon le type de milieu (urbain, semi-urbain, semi-rural, rural). Ces compositions pourraient notamment être établies à la suite de la campagne MODECOM actuellement en cours d'actualisation.

Si la situation locale le justifie ou s'il s'agit d'un paramètre maîtrisé (cas d'une collectivité utilisant le Bilan Carbone® pour planifier son système de gestion des déchets par exemple), d'autres jeux de données pourraient être utilisés.

III.2.2 EMISSIONS DIRECTES DUES AU DECHETS

Afin de permettre l'appropriation du guide aux entreprises de traitement des déchets, le poste « Emissions des procédés industriels ou agricoles (autres que résultant de l'usage de l'énergie) » devrait être enrichi de l'ensemble des émissions directes dues aux déchets et présentées dans les phases 1 et 2 de la présente étude.

Les émissions prises en compte dans le cadre de l'actualisation du guide et présentées dans les phases 1 et 2 sont rappelées dans le tableau ci-dessous :

Filières	Incinération	Enfouissement	Compostage
Emissions	CO ₂ , N ₂ O	CH ₄	CH ₄ , N ₂ O

- **Facteurs d'émission génériques ou mesures directes**

L'utilisation de **mesures directes** pour les émissions permet certes d'obtenir une image précise des émissions à un instant donné mais dans une perspective évolutive, cette approche ne permet pas de **dissocier la part intrinsèquement liée aux caractéristiques de l'installation de celle liée aux déchets**. Par exemple, une modification de la composition d'une année à l'autre pourrait améliorer le Bilan Carbone® de l'entreprise sans que de réelles améliorations intrinsèques aient eu lieu. Cette approche peut s'avérer peu pertinente au vu des objectifs de la méthode Bilan Carbone®, à savoir de donner une mesure de la performance environnementale de l'entité afin de permettre à celle-ci d'engager une démarche de progrès.

Par souci de cohérence avec la méthode Bilan Carbone® dans sa forme actuelle, mais également afin d'homogénéiser les pratiques, l'approche recommandée consiste à systématiquement utiliser les facteurs d'émissions proposés, sauf si la situation locale le justifie.

Sauf si les spécificités locales le justifient, les facteurs d'émissions directes proposés dans le guide seront toujours privilégiés face à des mesures directes d'émissions.

Concernant les émissions de CO₂ de l'incinération et de CH₄ dues à la dégradation des déchets (méthanisation, enfouissement), il existe des modèles permettant de relier les émissions aux caractéristiques des déchets (cf. section II). Conformément aux recommandations préconisées dans les sections précédentes, on utilisera les compositions des déchets et les modèles correspondant pour approximer au plus juste ces émissions. Concernant les émissions du compostage et de N₂O de l'incinération, les facteurs génériques seront utilisés par défaut.

- **N₂O du compostage et de l'incinération**

Concernant les émissions de N₂O du compostage et de l'incinération, la littérature est peu abondante et les processus sont complexes. Il n'existe pas de modèle fiable permettant de relier directement la composition du déchet à un facteur d'émission. Pour ces émissions, il est donc recommandé **d'utiliser les facteurs d'émissions génériques présentés dans la phase 2.**

Si des mesures directes fiables sont effectuées, et que l'entreprise souhaite mettre en avant des efforts pour la réduction du N₂O dans les gaz émis, on peut envisager de remplacer les émissions calculées à partir des facteurs génériques par les données spécifiques.

- **CO₂ de l'incinération**

Concernant les émissions de CO₂ de l'incinération, il est nécessaire de ne comptabiliser que les émissions de CO₂ fossile (cf I.3.1). Avec un jeu de composition des déchets différenciés, des facteurs par type de milieu pourraient être intégrés dans la méthode. Par défaut, **l'utilisation du facteur pour les OM proposé dans la phase 2 est recommandée (cf II.4).**

Si nécessaire, et si la situation géographique le justifie, on pourra utiliser les facteurs d'émissions directes suivants, calculés en faisant l'hypothèse que 100% du carbone des papiers, cartons, textiles sanitaires, et la moitié du carbone des combustibles non classés est biogénique :

CATÉGORIE	PROVINCE				SYCTOM de Paris (%)	MOYENNE NATIONALE DE RÉFÉRENCE
	Urbain (%)	Semi-urbain (%)	Rural (%)	Ensemble (%)		
%C sur brut	21,5%	20,1%	20,9%	20,9%	24,8%	21,3%
%C fossile/Ctotal	34%	35%	34%	34%	38%	35%
FE Incinération/Direct (kg éq C/t)	69	66	68	68	90	70

L'utilisation de mesures directes des émissions de CO₂ est envisageable, à deux conditions :

- La composition des déchets entrants est connue, et les mesures sont effectuées de telle façon que l'on peut attribuer sans ambiguïté aux déchets considérés.
- En particulier, la part de carbone fossile dans les déchets incinérés est connue

- **Cas des émissions de biogaz**

Dans les centres de stockage des déchets, les déchets sont stockés pendant plusieurs années et émettent sur de très longues périodes. La problématique qui se pose est de savoir quelle est la part des émissions du déchet qu'il faut prendre en compte.

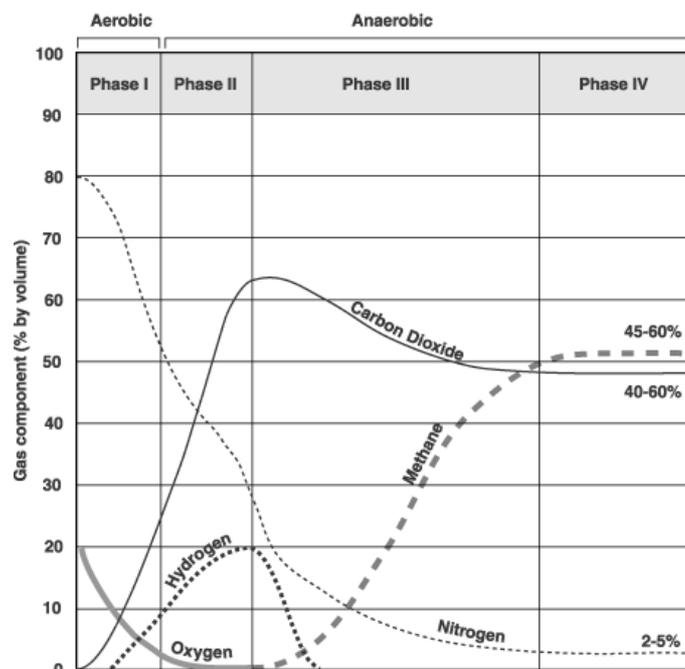


Figure 7: Evolution de la composition du biogaz en site d'enfouissement (EPA, 1997)

Les émissions varient fortement au cours du temps. Plusieurs méthodes de quantification sont envisageables dont :

- Prendre en compte l'historique des déchets stockés et calculer les émissions des déchets l'année N en utilisant un modèle cinétique de dégradation (cf II.5.3.1),
- Considérer les déchets arrivés dans le centre de stockage l'année N et imputer la totalité des émissions futures dues à ces déchets à l'année N,
- Considérer les déchets arrivés dans le centre de stockage l'année N, calculer la totalité des émissions futures dues à ces déchets et réaliser un amortissement sur X années pour en imputer une partie à l'année en cours

Ces méthodes de calculs permettent de s'approcher des émissions réelles du centre de stockage. Toutefois, les incertitudes sur ces émissions sont fortes et l'objectif de la méthode Bilan Carbone® n'est pas d'aboutir à une quantification précise mais de permettre l'identification des postes les plus impactants pour faciliter la mise en place d'une démarche de progrès. Par ailleurs, comme discuté précédemment, les quantités et la composition des déchets enfouis ne sont pas des leviers d'amélioration à la portée de l'exploitant.

Dans ce contexte, nous recommandons d'utiliser par défaut les compositions des déchets qui auront été fixées afin de calculer un facteur d'émission pour un mix d'OM en appliquant la deuxième méthode, à savoir de considérer l'ensemble des déchets enfouis pendant l'année de réalisation du Bilan Carbone® et de comptabiliser le total des émissions futures que les déchets engendreront. **On réalise alors le Bilan Carbone® des déchets enfouis l'année N, il convient de bien préciser ce point lors de la présentation des résultats du Bilan Carbone®.**

Cette approche est celle qui a été suivie pour l'actualisation du guide en phase 2 et est détaillée en II.5.3.1

Le calcul des émissions directes de CH₄ s'écrirait ainsi :

$$E_{CH_4} = Q_{déchets} \times FE_{OM} \times (1 - T_{captage}) \times (1 - T_{ox})$$

$Q_{déchets}$: Quantité de déchets enfouie pendant l'année

FE_{OM} : Facteur d'émission, intégrant les émissions futures de CH₄

T_{captage} : Taux de captage du méthane

T_{ox} : Taux d'oxydation, fixé à 10% par défaut

Un facteur générique pour les ordures ménagères est proposé en II.5.3.5. La même méthodologie de calcul pourra être développée pour calculer des facteurs d'émissions pour les autres compositions types qui auront été définies.

Les taux de captage et d'oxydation sont des paramètres d'amélioration du centre de stockage. Si des mesures directes sont effectuées pour affiner ces paramètres, elles ne doivent pas omettre le fait qu'ils pourront varier au cours du temps.

Synthèse des recommandations pour les émissions directes

- a. Sur la base des compositions types de déchets qui auront été définies, des facteurs d'émissions de CO₂ pour l'incinération et de CH₄ pour l'enfouissement, différenciés par milieu mais communs à tous les sites pourraient être proposés. L'utilisation de ces facteurs par défaut est recommandée.
- b. Dans le cas des émissions de CO₂ de l'incinération, **les mesures directes peuvent se substituer aux calculs** à partir des facteurs d'émission génériques proposés, à **condition que la composition des déchets entrant soit parfaitement connue**. Dans ce cas, il est important de noter que le facteur d'amélioration ne sera pas fondé sur les émissions brutes, **mais sur le rapport entre les émissions brutes et le contenu en carbone fossile des déchets entrant**.
- c. Concernant les émissions des centres de stockage, nous recommandons **d'affecter l'intégralité des émissions futures engendrées par les déchets stockés pendant l'année, on réalise alors le Bilan Carbone® des déchets enfouis pendant l'année, point qu'il convient de préciser avec clarté**. Les mesures directes de ces émissions étant généralement difficiles et imprécises, il est recommandé d'utiliser les facteurs d'émissions directes génériques. Les taux de captage et d'oxydation peuvent faire l'objet de mesures directes, car ce sont des leviers d'amélioration.
- d. Concernant les autres émissions directes, l'utilisation par défaut des facteurs d'émissions génériques proposés dans la phase 2 est recommandée. Si des mesures directes sont effectuées, elles peuvent se substituer aux calculs.

III.2.3 ÉMISSIONS ÉVITÉES : VALORISATION MATIÈRE ET ÉNERGÉTIQUE, SEQUESTRATION

III.2.3.1 ENJEUX DE LA VALORISATION : POURQUOI INTÉGRER DES ÉMISSIONS ÉVITÉES DANS LA MÉTHODE BILAN CARBONE® ?

Certaines activités de traitement des déchets peuvent remplir plusieurs fonctions à la fois. Par exemple, une unité d'incinération ou un centre de stockage peuvent traiter des déchets et produire de l'énergie tandis qu'un centre de recyclage peut traiter un flux de ferraille et produire de la matière première secondaire.

La valorisation est une composante forte de l'optimisation environnementale des filières de traitement des déchets. En produisant de la chaleur revendue à un industriel voisin, l'incinérateur contribue à limiter le recours à des ressources d'origine fossile et contribue à limiter les émissions de gaz à effet de serre, il en va de même pour la production d'électricité. En ce sens, **il est souhaitable que le Bilan Carbone® incite à optimiser et maximiser la valorisation énergétique des déchets**. De façon similaire, en orientant ses déchets vers une filière de recyclage, une entité contribue à limiter l'extraction de ressources naturelles et les émissions de GES qui y sont associées. Le compostage

peut également être perçu comme une forme de valorisation, en effet le compost peut limiter les apports en fertilisants inorganiques et limiter les émissions de GES associées. Enfin, la valorisation des mâchefers en sous-couche routière est une forme de valorisation car elle évite l'utilisation de granulats. **La valorisation matière est donc également un levier d'amélioration qu'il est souhaitable de faire transparaître dans la méthode Bilan Carbone®.**

Par souci d'homogénéité entre les valorisations et afin de montrer l'enjeu d'orienter des déchets vers de la valorisation matière, des impacts évités liés à cette valorisation peuvent être proposés lorsqu'une entreprise de traitement des déchets réalise son Bilan Carbone®.

L'argumentaire pour intégrer des impacts évités par ces activités repose sur les méthodologies ACV. Conformément à la norme ISO 14044 sur l'ACV, la méthodologie des impacts évités par extension de système permet de ramener un système multifonctionnel étudié à la seule fonction de traiter les déchets et justifie la prise en compte d'émissions évitées par la production d'énergie ou de matière.

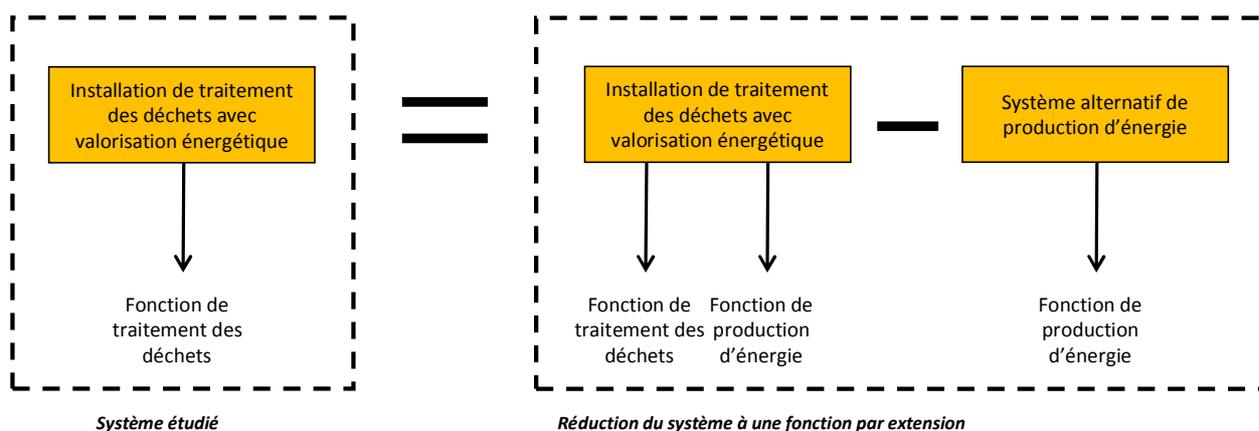
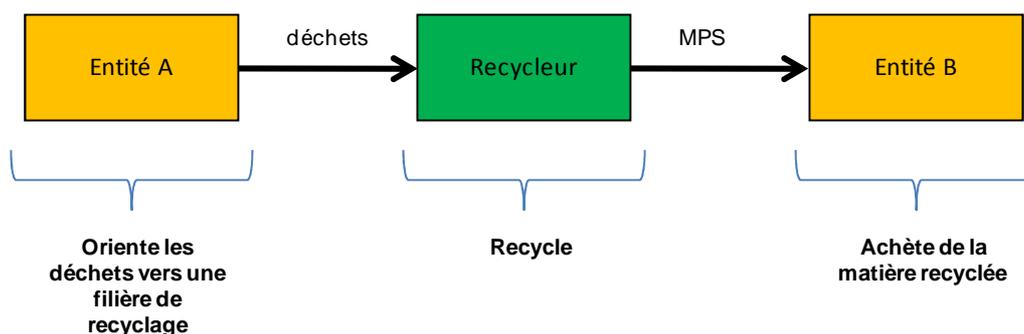


Figure 8: Exemple de prise en compte des impacts évités par extension de système pour une installation avec valorisation énergétique

Une particularité de la valorisation matière et énergie est qu'elle mobilise plusieurs acteurs, tous indispensables. **C'est l'ensemble de la chaîne de ces acteurs qui est responsable des bénéfices environnementaux.**

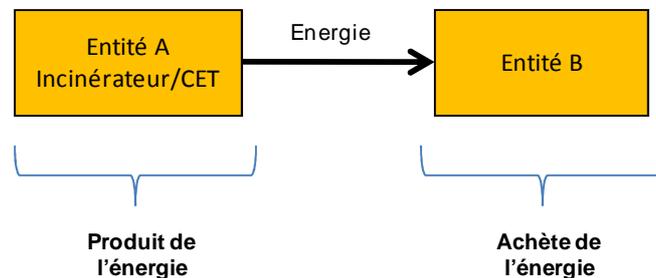
Par exemple pour une filière de recyclage :



- L'entreprise A envoie ses déchets vers un recycleur,
- Le recycleur B recycle les déchets et produit de la matière première secondaire,
- L'entreprise C achète la matière première secondaire, et évite de recourir à de la matière première vierge.

Les bénéfices de la filière apparaissent en raison **du différentiel d'émissions de GES entre produire de la matière secondaire et produire de la matière primaire**. En revanche, il est clair que tous les maillons de la chaîne sont indispensables pour créer ce différentiel.

Il en est de même pour une filière avec valorisation énergétique :



- L'incinérateur A produit de la chaleur,
- Le réseau de chaleur municipal B achète cette énergie et évite par exemple de brûler du gaz naturel.

Ici encore, l'ensemble de la chaîne est indispensable. Si l'entité B n'achète qu'une partie de la chaleur produite, le reste est perdu et ne contribue pas à éviter le recours à des ressources fossiles plus émettrices.

L'intégration de ces bénéfices dans le Bilan Carbone® d'un seul de ces acteurs introduit donc une problématique d'allocation. Deux approches sont envisageables :

- On effectue **une répartition de ces bénéfices**, arbitraire. Cette approche est présentée en annexe.
- On alloue **l'ensemble de ces bénéfices à tous les acteurs de la chaîne**. Cette approche induit deux précautions. Il existe **un risque de double compte lors de bilans consolidés entre deux entreprises** dont la première orienterait ses déchets vers la valorisation matière et une seconde, qui achèterait ces mêmes déchets recyclés. Les périmètres étant différents, ces émissions évitées ne peuvent être « retranchées » des émissions directes et indirectes de l'entité.

La répartition des bénéfices étant **délicate, arbitraire et source potentielle de conflits d'intérêt** dans une optique de présentation ou de communication, la deuxième approche est préconisée.

Afin d'éviter toute confusion, les émissions évitées par la valorisation énergie/matière nécessitent **d'être présentées séparément** et ne **doivent pas être sommées** avec les émissions directes et indirectes. Si **ces totaux peuvent faire l'objet d'une comparaison en ordre de grandeur** (comme toute analyse quantitative d'un résultat Bilan Carbone®), **il est préférable d'en effectuer une analyse disjointe** et d'être particulièrement prudent lors de la consolidation de plusieurs Bilan Carbone® d'entités d'une même chaîne de valorisation afin d'éviter tout double comptage.

NB : Les chapitres qui suivent sont propres aux activités du déchet, le cas des autres entreprises est présenté en III.3.

Afin de mettre en avant les leviers d'amélioration liés à la valorisation matière et énergie, un poste spécifique « Emissions évitées/Contribution aux émissions évitées » doit être créé dans la méthode Bilan Carbone®.

Malgré le fait qu'une chaîne d'acteurs (potentiellement hors du périmètre de l'entité) est nécessaire pour que ces bénéfices soient réels, il est recommandé d'éviter toute allocation. Chaque maillon de la chaîne, s'attribue l'ensemble des bénéfices.

III.2.3.2 VALORISATION ENERGETIQUE ET AUTOCONSOMMATION

III.2.3.2.a Production d'énergie

Lorsqu'une entreprise de traitement des déchets produit et revend de l'énergie, celle-ci vient se substituer à l'énergie produit sur le réseau. On attribue donc à l'entreprise, dans le Bilan Carbone® actuel, les économies d'émission de gaz à effet de serre ainsi réalisées, en tant qu'**émissions évitées**.

La prise en compte des émissions évitées reflète l'idée que la fonction première de l'entreprise est l'élimination de déchets, et que l'énergie éventuellement générée et revendue est une manière de valoriser un sous-produit (chaleur générée par la combustion dans un incinérateur par exemple), sous-produit ayant un impact positif sur les émissions de GES. La façon de comptabiliser ces émissions varie en fonction de l'énergie produite (électricité, chaleur, ou combustible).

Pour rappel, seule l'énergie **produite et vendue** peut être créditée.

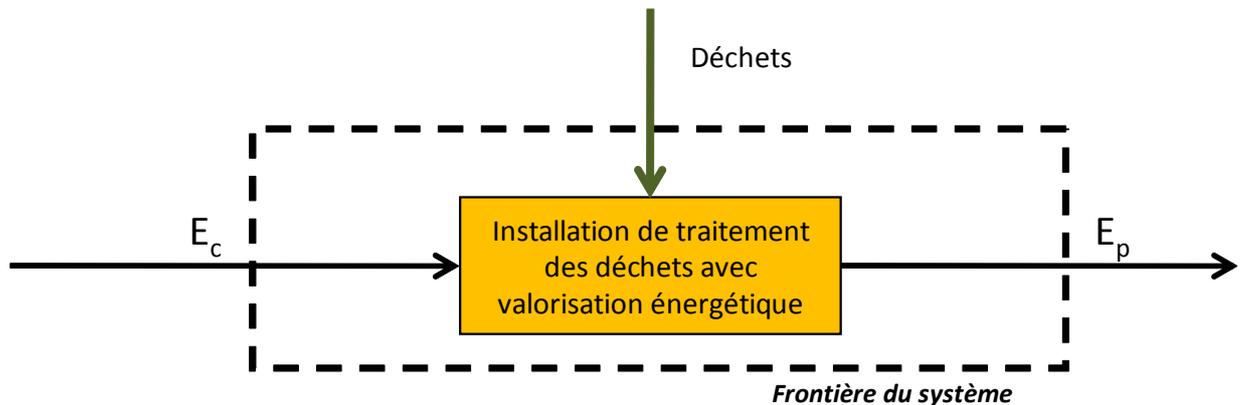
III.2.3.2.b Prise en compte de l'autoconsommation

Pour les installations produisant de l'énergie (incinération avec valorisation énergétique, méthanisation,...), on peut s'interroger sur le bien fondé d'affecter à l'énergie autoconsommée par le site un bénéfice de substitution, **il ne faut pas associer de facteur d'émission à cette énergie autoconsommée, les bénéfices de l'autoconsommation sont naturellement pris en compte.**

Pour illustrer ce point, comparons deux installations identiques, dont l'une autoconsomme une partie de l'énergie produite, et l'autre revend toute l'énergie.

Soit E_c leur consommation énergétique totale.

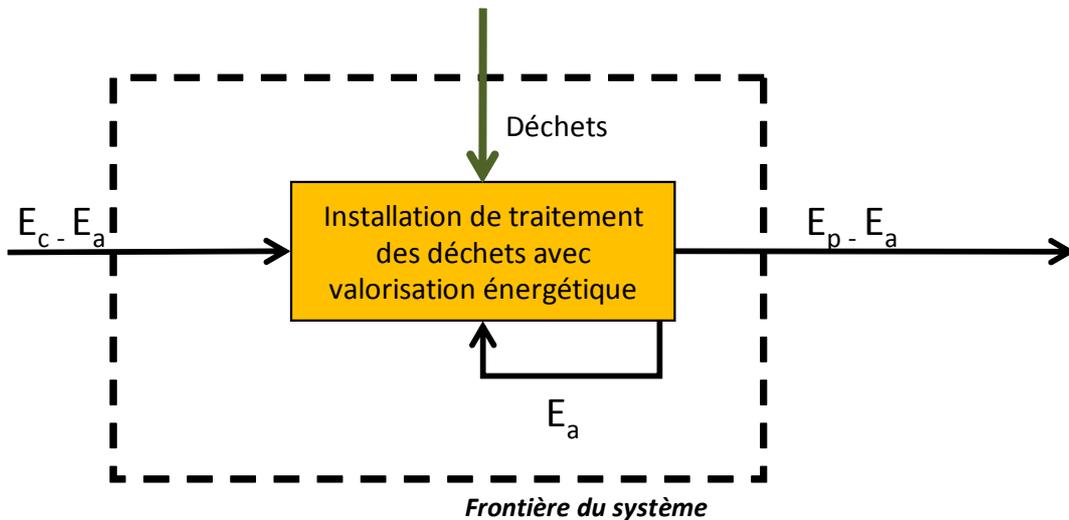
L'une revend la totalité de l'énergie produite E_p , et doit donc importer E_c .



Son bilan de gaz à effet de serre (en ne considérant que l'énergie consommée et produite), s'écrit :

$$B_{C_1} = E_c \times F_c - E_p \times F_p$$

L'autre autoconsomme une partie E_a de l'énergie produite :



Son bilan de gaz à effet de serre d'écrit alors :

$$B_{C_2} = (E_c - E_a) \times F_c - (E_p - E_a) \times F_p$$

$$B_{C_2} = E_c \times F_c - E_p \times F_p - E_a \times (F_p - F_c)$$

$$B_{C_2} = B_{C_1} - E_a \times (F_c - F_p)$$

Ainsi, en considérant l'énergie autoconsommée comme une boucle interne, et en ne considérant que les flux d'énergies entrant et sortant de l'installation, les effets de l'autoconsommation sont pris en compte.

On voit par ailleurs que si le facteur d'émission de l'énergie consommée est supérieur au facteur d'émission évitée de l'énergie revendue, l'autoconsommation améliore le bilan de l'installation. Ainsi, une installation qui consomme du fuel et revend de l'électricité aura tout intérêt à autoconsommer l'énergie produite, et ainsi réduire sa consommation de fuel.

En conclusion, les bénéfices de l'autoconsommation sont naturellement pris en compte si l'on considère qu'il s'agit d'une boucle interne. Dans le cadre du calcul des émissions de GES associées au système énergétique, il conviendra :

- D'affecter des émissions à l'énergie entrant dans le système
- D'affecter des émissions évitées à l'énergie sortant du système (énergie **produite et vendue**).

Synthèse des recommandations pour la comptabilisation des émissions évitées par valorisation énergétique

- a. Si l'entité considérée produit de l'électricité à partir des déchets qu'elle reçoit, elle procède, lors de son Bilan Carbone®, à l'évaluation des émissions évitées par valorisation énergétique, pour alimenter le poste « Emissions évitées/contribution aux émissions évitées ».
- b. Seule l'énergie effectivement **revendue**, ou bien utilisée dans un processus extérieur au périmètre du Bilan Carbone® effectué, peut être comptabilisée. L'énergie autoconsommée n'est pas prise en compte dans le bilan.
- c. L'entreprise doit donc dans un premier temps évaluer la quantité d'énergie revendue, en kWh pour l'électricité ou la chaleur, et en masse ou volume pour les combustibles.
- d. Dans le cas d'électricité redistribuée sur le réseau, ou utilisée dans le cadre d'une activité externe au périmètre du Bilan Carbone® effectué, on utilisera **par défaut le facteur d'émission moyen de l'électricité en France, soit 23g éq C/kWh**, comme discuté en I.3.4.1
- e. Dans le cas de chaleur, il est nécessaire de prendre en compte le contexte local pour déterminer à quelle source cette énergie se substitue. Par défaut, on utilisera **le facteur d'émission moyen de production de chaleur en Europe, soit 76g éq C/kWh**, comme discuté en I.3.4.2.
- f. Dans le cas de combustible revendu (méthane redistribué sur le réseau de gaz naturel par exemple), on utilisera le facteur d'émission associé à ce combustible, tel qu'indiqué dans le guide des facteurs d'émissions du Bilan Carbone®

III.2.3.3 VALORISATION MATIERE : RECYCLAGE

Dans la méthode Bilan Carbone® actuelle, la prise en compte du recyclage est faite par la méthode dite des « stocks ». Celle-ci consiste à attribuer les bénéfices du recyclage à l'achat de matière première recyclée. Cette approche est justifiée dans le guide méthodologique de la manière suivante : *« L'avantage de cette méthode est qu'elle se base sur une approche statistique : il suffit de savoir combien de tonnes de matériau sont recyclées dans la production totale d'une année, et la proportion moyenne est supposée applicable à chaque unité de production prise en particulier, alors que la méthode des impacts évités requiert de savoir exactement ce que l'entité qui produit des déchets en fait. ».*

Ce premier argument n'est pas valable pour une entreprise de traitement des déchets, qui sait exactement ce que deviennent les déchets qu'elle traite, et dispose de certains leviers d'amélioration pour améliorer la qualité et la quantité des sous-produits valorisables.

- **Déchets orientés vers une filière de recyclage (A)**

Dans sa forme actuelle, la méthode Bilan Carbone® n'incite pas les entreprises à recycler les déchets car l'intégralité des bénéfices du recyclage sont affectés à l'achat de matières recyclées en raison de l'approche méthodologique choisie (méthode des stocks).

Afin d'encourager l'orientation des déchets vers les filières de recyclage, nous proposons d'alimenter le poste « Impacts évités/Contribution aux émissions évitées » par l'ensemble des bénéfices du recyclage à l'entité qui oriente des déchets vers ces filières. Pour rappel, ces bénéfices naissent du différentiel d'émissions entre produire de la matière première vierge et produire de la matière secondaire.

Le déchet envoyé dans la filière va subir une transformation pour passer au statut de matière première secondaire, celle-ci va alors se substituer à de la matière première vierge.

$$FE(\text{évitées}) = FE(\text{production de matière recyclée}) - FE(\text{production de matière vierge})$$

Par exemple, pour une tonne d'acier envoyée vers une filière de recyclage, le facteur d'émission associé à cette action est (cf II.8.1):

$$FE = 300 - 870 = - 570 \text{ kg éq C / t}$$

Dans le cadre des métiers du déchet, cette recommandation sera par exemple appliquée pour **l'orientation vers le recyclage des ferrailles récupérées par une unité d'incinération**, ou pour **l'orientation vers le recyclage des déchets triés par un centre de tri**.

- **Cas particulier d'un recycleur**

Le recycleur est un maillon particulier de la chaîne de recyclage au sens où il valorise un flux. Les déchets entrants deviennent des matières premières secondaires.

Pour rappel, concernant le flux entrant de déchet, comme pour toutes les autres entreprises et conformément aux recommandations du guide méthodologique, **aucune émission due à des procédés amont n'est à considérer**.

Ce sont l'orientation des déchets vers le recyclage et l'achat de matière recyclée qui sont à encourager pour limiter l'épuisement des ressources, et c'est le cycle global qui apporte un bénéfice environnemental. Le procédé de recyclage lui-même est un maillon de cette chaîne. Et l'attribution d'émissions évitées par la mise sur le marché de matière première secondaire peut être plus discutable. Nous proposons néanmoins **d'allouer les émissions évitées par la chaîne de recyclage au recycleur** afin d'encourager l'optimisation des rendements du process (i.e. la quantité de matière secondaire produite par quantité de matière récupérée).

L'idée est d'allouer des impacts évités pour la mise sur le marché de matière première secondaire. Celle-ci se substituant à de la matière vierge, le bénéfice de cette valorisation s'écrit :

$$FE(\text{évitées}) = - FE(\text{production de matière vierge})^1$$

La méthode Bilan Carbone® n'étant pas adaptée pour intégrer le recyclage en boucle ouverte, ce bénéfice ne peut être octroyé que **pour le recyclage en boucle fermée**. Une discussion sur la quantification de ces bénéfices en cas de boucle ouverte est néanmoins présentée en annexe.

Comme pour les autres formes d'émissions évitées, nous recommandons de comptabiliser ces émissions de manière séparée et de ne pas les sommer aux autres émissions de l'entité.

Le recycleur est responsable de la qualité du produit mis sur le marché, et donc de la robustesse de l'hypothèse de substitution entre matière secondaire et matière première. L'octroi de ces bénéfices n'est donc justifié qu'à la seule condition que le produit permette effectivement d'éviter l'utilisation de matière vierge.

¹ Cette approche est cohérente avec le facteur proposé pour l'orientation vers le recyclage, les émissions dues à la production de matière recyclée apparaissent dans les émissions directes et indirectes lorsque le recycleur effectue le Bilan Carbone® de ces postes d'activité.

Synthèse des recommandations pour la comptabilisation des émissions évitées par valorisation matière (recyclage)

L'entité considérée procède à l'évaluation des émissions évitées par la valorisation matière (recyclage) pour alimenter le poste « Emissions évitées/contribution aux émissions évitées » si :

- a. Elle oriente des déchets vers le recyclage (ferrailles d'un incinérateur, centre de tri,...). Le facteur d'émissions à associer à cette action est alors :

$$FE(\text{évitées}) = FE(\text{production de matière recyclée}) - FE(\text{production de matière vierge})$$

- b. L'entité est un recycleur, elle procède, lors de son Bilan Carbone®, à l'évaluation des émissions évitées par valorisation matière, en s'octroyant un bénéfice pour la quantité de matière première secondaire mise sur le marché. Le facteur d'émission associé à cette action s'écrit :

$$FE(\text{évitées}) = -FE(\text{production de matière vierge})$$

III.2.3.4 AUTRES FORMES DE VALORISATION

• Valorisation des mâchefers en sous-couche routière

Pour les mâchefers, les bénéfices apportés par la valorisation en sous-couche routière sont insignifiants (Birgisdóttir H., 2005¹), nous proposons d'écarter ce poste du Bilan Carbone®.

• Production de compost

Pour le compost (centre de compostage, méthanisation), les bénéfices apportés sont liés aux apports en nutriments qui permettent d'éviter l'utilisation d'engrais de synthèse. La gestion globale des procédés de compostage ayant une influence sur la qualité du compost, nous recommandons de prendre en compte les émissions évitées par celui-ci comme effectué en II.6.3.4, en utilisant la composition NPK du compost pour calculer un facteur d'émission.

Pour un compost contenant, 6.2 kg/t de N, 2 kg/t de P et 4.5 kg/t en K, le facteur calculé est ainsi :

Fertilisants	Emissions associées à la production de fertilisant chimique (kg eq CO ₂ /kg nutriment)	Contenu en nutriments du compost (kg/t de compost)	Emissions évitées (kg eq CO ₂ /t compost)	Emissions évitées (kg eq C/t compost)
N (acide nitrique)	5.29	6.2	32.8	8.9
P (P ₂ O ₅)	0.52	2	1.0	0.3
K (K ₂ O)	0.38	4.5	1.7	0.5
Total			35.5	9.7

En l'absence de données spécifiques, ce facteur de -9.7 kg éq C/t de compost pourra être utilisé.

Comme énoncé précédemment, l'octroi de ces bénéfices n'est légitime que si le compost est effectivement épandu.

¹ Birgisdóttir H., 2005, Life cycle assessment model for road construction and use of residues from waste incineration, Ph.D Thesis, Institute of Environment & Resources, Technical University of Denmark

Des émissions évitées sont associées à la mise sur le marché de compost, si celui-ci est effectivement épandu.

III.2.3.5 CAS DE LA SEQUESTRATION

La prise en compte de la séquestration est discutée dans la section I.3.1.2. Par cohérence avec l'orientation choisie dans les phases 1 et 2 de la présente étude, nous proposons de prendre en compte la séquestration et de l'intégrer dans le poste « Emissions évitées/contribution aux émissions évitées ».

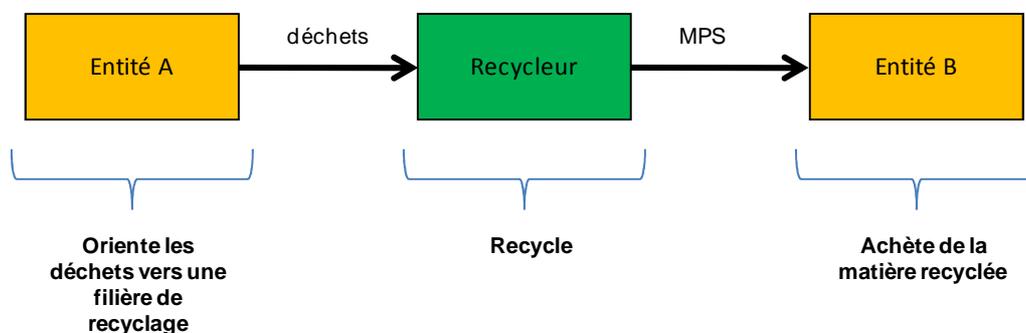
Les facteurs d'émissions correspondant sont présentés dans les sections II.6.3.4 pour le compostage et II.5.3.3 pour l'enfouissement.

III.3 VALORISATION MATIERE ET ENERGETIQUE : CAS DES AUTRES ACTEURS AVAL ET AMONT

III.3.1 VALORISATION MATIERE

Dans sa forme actuelle, la méthode Bilan Carbone® n'incite pas les entreprises à recycler les déchets car l'intégralité des bénéfices du recyclage sont affectés à l'achat de matières recyclées en raison de l'approche méthodologique choisie (méthode des stocks) ; les bénéfices sont comptabilisés lors de l'achat de matière recyclée, un facteur nul est utilisé pour l'orientation des déchets vers le recyclage.

Afin de mieux mettre en lumière les leviers d'amélioration associés au recyclage et comme discuté précédemment, le parti pris proposé est d'allouer l'ensemble des bénéfices du recyclage à chaque acteur de la chaîne.



Afin d'éviter toute confusion et de ne pas sommer ces émissions évitées avec les émissions directes et indirectes calculées par l'entité réalisant son Bilan Carbone®, il est souhaitable de comptabiliser ces émissions dans un nouveau poste « Emissions évitées/contribution aux émissions évitées ».

III.3.1.1 CAS GENERAL D'UNE ENTITE QUI ORIENTE SES DECHETS VERS LE RECYCLAGE (A)

Pour une entreprise orientant ses déchets vers le recyclage, on appliquera le même principe que celui défini en III.2.3.3.

Le déchet envoyé vers la filière va subir une transformation pour passer au statut de matière première secondaire, celle-ci va alors se substituer à de la matière première vierge. En utilisant les facteurs proposés dans les premières parties (cf II.8.1) :

$$FE(\text{évitées}) = FE(\text{production de matière recyclée}) - FE(\text{production de matière vierge})$$

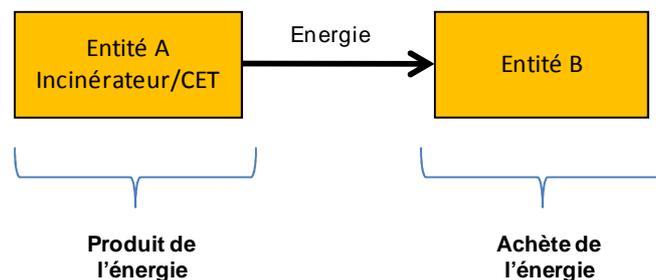
Ceci n'est possible que pour le recyclage en boucle fermée, une méthodologie de calcul pour intégrer les bénéfices du recyclage en boucle ouverte est proposée en annexe.

III.3.1.2 CAS GENERAL D'UNE ENTITE QUI ACHETE DE LA MATIERE RECYCLEE (B)

La méthode Bilan Carbone® actuelle incite déjà les entités à acheter de la matière recyclée puisque les facteurs d'émissions des matériaux recyclés sont plus faibles que ceux des matériaux issus de matière vierge. **Pour une installation de traitement de déchets comme pour n'importe quelle entreprise, on appliquera les principes de la méthode Bilan Carbone® dans sa forme actuelle.**

III.3.2 VALORISATION ENERGETIQUE

Le cas de la valorisation énergétique est identique. Le flux d'énergie valorisée n'apporte des bénéfices que si l'énergie produite est effectivement utilisée et se substitue à un mode alternatif de production d'énergie.



Le cas d'une entreprise de traitement des déchets qui valorise de l'énergie a été discuté en III.2.3.2. Discutons le cas d'une entité qui achèterait cette énergie.

Concernant la valorisation électrique, la situation est peu vraisemblable, l'électricité générée par l'installation est en effet injectée sur le réseau et indissociable du mix électrique moyen. L'entreprise B utilisera le facteur d'émission du mix électrique moyen pour quantifier les émissions de sa consommation d'électricité.

Concernant la valorisation énergétique sous forme de chaleur, l'entité B doit affecter à l'énergie qu'elle achète un facteur d'émission. Un facteur d'émission spécifique peut alors être calculé.

Si l'entité A est en mesure de fournir ces données, on utilisera le contenu carbone du kWh vendu, c'est-à-dire le rapport entre les émissions directes et indirectes du producteur sur l'énergie vendue, sur une période donnée.

La création d'un poste supplémentaire « Emissions évitées/contribution aux émissions évitées » permettrait de favoriser l'orientation des déchets vers le recyclage et l'achat d'énergie valorisée.

Conformément aux recommandations effectuées pour les entreprises de traitement des déchets, **les émissions évitées liées à la valorisation doivent être présentées séparément** des autres postes et **ne pas être sommées aux autres émissions** de l'entité afin d'éviter toute confusion.

Par ailleurs, une attention particulière est nécessaire lors de réalisation de bilans consolidés faisant intervenir **plusieurs maillons d'une même chaîne de valorisation** afin d'éviter tout **risque de double comptage**.

III.4 SYNTHÈSE

L'objectif de la méthode Bilan Carbone® est de permettre l'**identification des leviers d'améliorations** d'une entité afin d'engager une démarche de progrès.

En ce sens les recommandations proposées visent à :

- Identifier les postes qui ne soulèvent **pas de difficultés particulières** et pour lesquels la méthode Bilan Carbone® actuelle est suffisante ;
- **Donner des recommandations** de calcul pour intégrer **certaines émissions spécifiques**;
- **Définir avec précision le statut** à accorder aux différents flux entrants et sortants d'une filière de traitement et la manière dont il est nécessaire de les prendre en compte (déchets entrants, sortants, flux d'énergie,...),
- Proposer **une évolution de la méthode** pour permettre l'**intégration de l'ensemble des leviers d'améliorations** des filières de traitement des déchets, et notamment ceux liés à la valorisation matière et énergie.

Compte tenu des spécificités des activités de traitement des déchets analysées en III.1, il est en effet justifié d'avoir une lecture particulière de la méthode Bilan Carbone®, qui peut pour certains aspects s'éloigner de la méthode Bilan Carbone® « classique ».

La principale difficulté résulte de **la valorisation matière/énergie qui est un fort levier d'amélioration pour ces filières et qui n'est pas intégrable en l'état** dans la méthode Bilan Carbone® actuelle. Du fait que la valorisation implique nécessairement l'implication de plusieurs acteurs (potentiellement hors du périmètre considéré) pour faire apparaître des bénéfices environnementaux en termes d'émissions de GES, deux orientations étaient envisageables :

- Aborder des problématiques d'allocation ;
- Allouer l'intégralité des bénéfices à tous les acteurs de la chaîne, et ainsi réaliser une comptabilité annexe des bénéfices.

Afin d'éviter les problématiques délicates et arbitraires d'allocation, l'évolution forte qu'il apparaît nécessaire d'effectuer consiste à **créer un poste supplémentaire** « Emissions évitées/Contribution aux émissions évitées » qui permet ainsi de comptabiliser les bénéfices apportés par la valorisation matière, la valorisation énergétique mais aussi des aspects plus spécifiques comme la production de compost ou la séquestration.

Dans ce contexte, la réalisation d'un Bilan Carbone® d'une entreprise de traitement des déchets revient à **réaliser deux bilans**, l'un représentant des émissions directes et indirectes, l'autre des émissions évitées.

Compte tenu des choix proposés, si **ces totaux peuvent faire l'objet d'une comparaison en ordre de grandeur** (comme toute analyse quantitative d'un résultat Bilan Carbone®), **il est préférable (voire indispensable) d'en effectuer une analyse disjointe** et d'être particulièrement prudent lors de la consolidation de plusieurs Bilan Carbone® d'entités d'une même chaîne de valorisation afin d'éviter tout double comptage.

Comme illustrée en III.3, la création d'un poste supplémentaire « Emissions évitées » peut également être faite avec cohérence pour n'importe quelle activité, si ces précautions d'interprétation sont respectées.

Les principaux choix méthodologiques d'application de la méthode Bilan Carbone® pour une filière de traitement des déchets sont compilés dans le tableau ci-après.

Tableau 101 : Grille méthodologique d'application de la méthode Bilan Carbone® à une activité de traitement des déchets

	Enfouissement	Méthanisation	Compostage	Incinération	Centre de tri	Centre de recyclage
Points particuliers	Préciser que l'on réalise le Bilan Carbone® des déchets enfouis l'année N.					
	Effectuer une analyse disjointe du poste « Emissions évitées ». Garder en tête la variabilité de la composition des déchets entrants dans l'interprétation des résultats.					
Matériaux entrants et services tertiaires	Les émissions dues à la production des déchets ne doivent pas être considérées. L'ensemble des émissions depuis le point d'émission jusqu'au centre de traitement doivent cependant être considérées.					
Déchets directs et eaux usées	Les émissions associées aux déchets envoyés vers d'autres filières doivent être intégrées.					
« Emissions des procédés industriels ou agricoles (autres que résultant de l'usage de l'énergie) »	On effectue le Bilan Carbone® des déchets enfouis l'année considérée. Les facteurs d'émissions génériques par défaut sont utilisés pour les émissions de CH ₄ .		Les facteurs d'émissions génériques par défaut sont utilisés pour les émissions de CH ₄ et de N ₂ O	Les facteurs d'émissions génériques par défaut sont utilisés pour les émissions de CO ₂ , N ₂ O. Pour le N ₂ O, des mesures spécifiques sont envisageables, pour le CO ₂ également si le taux de carbone fossile des déchets incinérés est connu.		
Emission évitées/Contribution aux émissions évitées (non existant)	La valorisation énergétique (électricité/chaleur) est prise en compte. La séquestration du carbone biogénique est prise en compte.	La valorisation énergétique (électricité/chaleur) est prise en compte.	La substitution du compost aux fertilisants chimiques est prise en compte. La séquestration du carbone biogénique est prise en compte.	La valorisation énergétique (électricité/chaleur) est prise en compte. La valorisation éventuelle des ferrailles est prise en compte en utilisant le facteur d'émission: FE(évitées)=FE(recyclé)-FE(vierge)	L'orientation des déchets vers la valorisation matière est prise en compte en utilisant le facteur d'émission: FE(évitées)=FE(recyclé)-FE(vierge)	La substitution des matières premières secondaires à la matière première vierge est prise en compte en utilisant le facteur d'émission: FE(évitées)= - FE(vierge)
Autres postes	On applique les principes du Bilan Carbone® comme s'il s'agissait d'une entreprise quelconque.					

ANNEXE : REFLEXION METHODOLOGIQUE COMPLEMENTAIRE SUR LE RECYCLAGE

1. Allocation des bénéfices du recyclage

Dans sa forme actuelle, la méthode Bilan Carbone® n'incite pas les entreprises à recycler les déchets car l'intégralité des bénéfices du recyclage sont affectés à l'achat de matières recyclées.

Pour pallier ce manque, le choix a été fait de créer un poste spécifique pour comptabiliser les émissions évitées en évitant de répartir les bénéfices du recyclage entre les différents acteurs mobilisés.

L'objectif de cette section est d'amorcer une réflexion méthodologique complémentaire qui permettrait d'allouer une partie des bénéfices du recyclage au fait d'envoyer des déchets vers cette filière.

- **Modèle théorique**

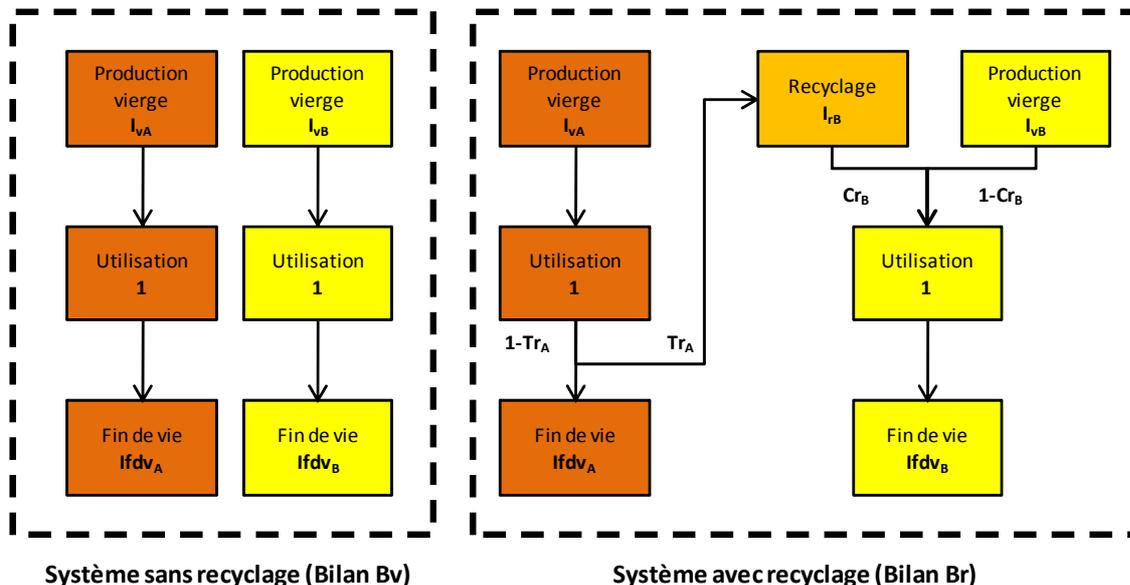
Modélisons le bilan du recyclage en considérant deux produits A et B dont les cycles de vie sont connectés : une partie des déchets de A est recyclé, et entre dans la composition du produit B.

Soient :

- C_r : contenu en recyclé
- T_r : le taux de recyclage
- I_v : les impacts de la production du matériau vierge
- I_r : les impacts du procédé de recyclage
- I_{fdv} : les impacts de la fin de vie des matériaux (enfouissement et incinération)
- B_v : le bilan du système sans recyclage
- B_r : le bilan du système avec recyclage
- $D_r = B_v - B_r$: différentiel lié au recyclage (c'est-à-dire la différence entre le bilan d'un système avec recyclage et celui d'un système sans recyclage)

En fin de vie, une partie Tr_A des déchets A est orientée vers le recyclage. Le recyclage de A permet de régénérer une quantité Cr_B de matière première entrant dans la composition du produit B.

Les systèmes de production des produits A et B avec et sans recyclage sont présentés ci-après :



Le bilan du système avec recyclage s'écrit :

$$B_r = I_{vA} + (1 - Tr_A) \times I_{fdvA} + Tr_A \times I_{rB} + (C_{rB} - Tr_A) \times I_{rB} + (1 - C_{rB}) \times I_{vB} + I_{fdvB}$$

$$B_r = [I_{vA} + I_{fdvA} + I_{vB} + I_{fdvB}] + C_{rB} \times (I_{rB} - I_{vB}) - Tr_A \times I_{fdvA}$$

$$B_r = B_v + C_{rB} \times (I_{rB} - I_{vB}) - Tr_A \times I_{fdvA} \quad (1)$$

Le recyclage apporte deux bénéfices :

- d'une part, l'envoi d'un déchet vers une filière de recyclage permet de divertir celui-ci d'une filière de traitement des déchets en lui conférant une deuxième vie : ce bénéfice est donné par le terme "- Tr_A.I_{fdvA}")

- d'autre part, le recyclage permet de produire de la matière première et évite donc l'extraction de nouvelles ressources : ce bénéfice est donné par le terme "C_{rB}.(I_{rB} - I_{vB})"

Ces bénéfices sont créés à l'interface des cycles de vie des produits A et des produits B et sont donc interdépendants. Dans le cadre d'une évaluation du bilan de A ou de B seuls, la problématique qui se pose est de savoir comment allouer ces bénéfices entre A et B. Autrement dit, comment doit être réparti ce bénéfice entre le fait d'avoir fait l'effort d'orienter A en fin de vie vers une filière de recyclage, et celui d'incorporer de la matière recyclée dans le produit B.

La méthode dite des stocks, utilisée dans le Bilan Carbone® actuel, revient à utiliser une règle de coupure en allouant les impacts et les bénéfices relatifs au produit A à A et ceux relatifs au produit B à B. Les bilans de A et de B avec recyclage s'écrivent alors :

$$B_{rA} = B_{vA} - Tr_A \times I_{fdvA} \quad (2)$$

$$B_{rB} = B_{vB} - C_{rB} \times (I_{rB} - I_{vB}) \quad (3)$$

Si le bilan se limite aux seules étapes de production, on retrouve ainsi la formule du Bilan Carbone® utilisée pour la prise en compte d'achat de matériau contenant du recyclé :

$$B_{rB} = (1 - C_{rB}) \times I_{vB} + C_{rB} \times I_{rB} \quad (4)$$

Concernant la fin de vie des déchets envoyés en recyclage, seul le transport doit être pris en compte dans la méthode Bilan Carbone® (4 kg eq C/t), comme le précise le guide méthodologique « avec cette méthode, les déchets orientés vers la filière recyclage ne sont pas comptabilisés comme déchets, mais comme un flux secondaire d'approvisionnement en matière première. Seuls sont pris en compte les gaz à effet de serre liés au transport de la part recyclée jusqu'à ce stock de matière première secondaire, et éventuellement aux processus de « mise en état » (broyage, lavage, etc.) de cette matière secondaire avant incorporation au stock. ». Ce terme correspond à la fin de vie « évitée » (-Tr_A.I_{fdvA}).

La production de matière première secondaire étant moins impactante que la production de matière première vierge (I_v>I_r), cette règle d'allocation porte donc l'essentiel des bénéfices du recyclage à l'achat de matière première recyclée et encourage peu les entreprises à recycler leurs déchets.

• Evolution possible du modèle

Une possibilité d'évolution de la méthode Bilan Carbone® serait d'utiliser une autre règle d'affectation des bénéfices afin d'en allouer une partie à l'achat de matière première recyclée, et l'autre partie à l'orientation vers le recyclage. Il convient de noter qu'il **s'agit purement d'un choix mathématique arbitraire.**

La règle d'allocation que BIO propose d'implémenter est celle du 50/50, qui consiste à **affecter la moitié des bénéfices à la fin de vie et la moitié des bénéfices à la production.** Par cohérence

avec la version actuelle du guide, **les bénéfices liés à la fin de vie évitée sont affectées à la fin de vie.**

Cette règle a déjà été discutée dans plusieurs publications ACV (Ekvall et Tillman, 1997¹, Ekvall 1994).

Soient :

B_{prod} : bilan de la production du matériau

$B_{recyclage}$: bilan de la fin de vie du matériau

C_r : contenu en recyclé du matériau

T_r : taux de recyclage

I_v : impact de la production du matériau à partir de matière vierge

I_r : impact de la production de matière secondaire (recyclage).

I_{fdv} : impact de la fin de vie

Ainsi, les formules de calcul à utiliser pour la production et la fin de vie de X tonnes de matériau seraient les suivantes:

$$B_{prod} = X \times \left(I_v + C_r \times \frac{(I_r - I_v)}{2} \right) \quad (5)$$

$$B_{recyclage} = X \times T_r \times \left(\frac{(I_r - I_v)}{2} - I_{fdv} \right) \quad (6)$$

Dans le cas où le taux de recyclage est égal au taux d'incorporation de recyclé ($C_r=T_r$, soit un système à l'équilibre), on retrouve la formule (1).

- **Mise en application**

Etudions cette approche à travers un exemple.

Soit une entreprise achetant 10 tonnes d'aluminium contenant 50% de recyclé, qui sont transformées et mises sur le marché. Différentes orientations en fin de vie pour ces 10 tonnes entrantes (déchets directs ou déchets après mise sur le marché) sont étudiées, on suppose que les déchets non recyclés sont envoyés en CET (impacts, I_{CET}).

Dans notre exemple :

$X=10$ tonnes

$I_v = 2670$ kg éqC/t (cf. section II.2.2.3)

$I_r = 140$ kg éqC/t

$C_r = 50\%$

$I_{CET} = 4$ kg éqC/t

$I_{fdv} = 4$ kg éqC/t (transport uniquement)

¹ Ekvall T, Tillman A.M. (1997), Open-loop recycling: Criteria for allocation procedures. Int J LCA 2(3)-155-162

Ekvall T.(1994) Principles for allocation at multi-output processes and cascade recycling. (1994). Proceedings of the European Workshop on Allocation in LCA, Centre of Environmental Science, Leiden University.

		Tr=50%
Production		$B_{\text{prod}} = X (I_v + C_r \cdot (I_r - I_v) / 2)$ $10 \times (2670 + 50\% \times (140 - 2670) / 2) = \mathbf{20\ 375\ kg\acute{e}qC/t}$
Fin de vie	Décharge (5 tonnes)	$B_{\text{CET}} = X \cdot (1 - T_r) I_{\text{CET}}$ $10 \times 50\% \times 4 = \mathbf{40\ kg\acute{e}qC/t}$
	Recyclage (5 tonnes)	$B_{\text{recyclage}} = X T_r ((I_r - I_v) / 2 - I_{\text{fdv}})$ $10 \times 50\% \times ((140 - 2670) / 2) + 4 = \mathbf{-6\ 305\ kg\acute{e}qC/t}$
Bilan total		14 090 kgéqC/t

		Tr=100%
Production		$B_{\text{prod}} = X (I_v + C_r \cdot (I_r - I_v) / 2)$ $10 \times (2670 + 50\% \times (140 - 2670) / 2) = \mathbf{20\ 375\ kg\acute{e}qC/t}$
Fin de vie	Décharge (0 tonne)	$B_{\text{CET}} = X \cdot (1 - T_r) I_{\text{CET}}$ 0 kgéqC/t
	Recyclage (10 tonnes)	$B_{\text{recyclage}} = X T_r ((I_r - I_v) / 2 - I_{\text{fdv}})$ $10 \times 100\% \times ((140 - 2670) / 2) + 4 = \mathbf{-12\ 646\ kg\acute{e}qC/t}$
Bilan total		7 729 kgéqC/t

		Tr=0%
Production		$B_{\text{prod}} = X (I_v + C_r \cdot (I_r - I_v) / 2)$ $10 \times (2670 + 50\% \times (140 - 2670) / 2) = \mathbf{20\ 375\ kg\acute{e}qC/t}$
Fin de vie	Décharge (10 tonnes)	$B_{\text{CET}} = X \cdot (1 - T_r) I_{\text{CET}}$ $10 \times 100\% \times 4 = \mathbf{40\ kg\acute{e}qC/t}$
	Recyclage (0 tonne)	$B_{\text{recyclage}} = X T_r ((I_r - I_v) / 2 - I_{\text{fdv}})$ 0
Bilan total		20 415 kgéqC/t

La méthode des stocks dans sa forme actuelle donne pour tous les scénarios:

Pour la production :

$$B_{\text{prod}} = X (C_r I_r + (1 - C_r) I_v) = \mathbf{14\ 050\ kg\acute{e}qC/t}$$

Pour la fin de vie :

$$B_{\text{fdv}} = -T_r I_{\text{fdv}} + (1 - T_r) I_{\text{CET}} = \mathbf{40\ kg\acute{e}qC/t}$$

Soit

$$B_{\text{tot}} = \mathbf{14\ 090\ kg\acute{e}qC/t}$$

L'évolution méthodologique proposée est une évolution de la méthode des stocks qui est représentative d'un système supposé être à l'équilibre : les matériaux envoyés en recyclage sont recyclés et les recyclats incorporés dans de nouveaux produits. Il est donc logique que cette évolution permette de retrouver la valeur obtenue par la méthode Bilan Carbone® actuelle lorsque le stock de matière recyclé est préservé en fin de vie (équilibre). L'entreprise utilise 5 tonnes d'aluminium recyclé, et en fin de vie ce stock est régénéré (cas où $T_r = C_r = 50\%$).

Pour un taux de recyclage plus important ($T_r > C_r$), le stock de matière secondaire est accru et les bénéfices du recyclage sont plus importants. A l'inverse, si le stock décroît ($T_r < C_r$), les bénéfices du recyclage diminuent.

L'allocation effectuée encourage donc à la fois l'incorporation de matière recyclée et l'orientation vers le recyclage.

- **Conséquence d'une telle évolution sur la méthode actuelle**

L'application de cette évolution méthodologique nécessiterait une refonte des postes « déchets directs » et « matériaux et services entrants » afin d'introduire les nouvelles formules de calcul. Le poste « émissions liées au traitement de fin de vie des produits ou services vendus » nécessiterait une refonte un peu plus profonde afin de différencier les émissions par matériaux, puisque actuellement un facteur de 4kgéqC/t est affecté à tous les matériaux envoyés en recyclage, quels qu'ils soient.

2. Cas du recyclage en boucle ouverte

Le recyclage en boucle ouverte dans son sens le plus strict consiste à réutiliser le matériau recyclé à la place d'un autre matériau. Par exemple, il est possible d'utiliser du plastique recyclé pour produire des palissades qui peuvent se substituer à des palissades en bois. Le recyclage est alors bénéfique si les impacts du procédé de recyclage sont inférieurs à ceux de la production du produit substitué.

Ces cas de figure ne sont actuellement pas modélisables par la méthode Bilan Carbone®, seul le recyclage des matériaux en boucle fermée est intégré.

Le recyclage en boucle ouverte est fréquent quand les propriétés du matériau recyclé sont trop différentes de celle du matériau vierge. Ces différences de propriétés font qu'il n'est alors pas possible de donner au matériau recyclé une deuxième vie identique à la précédente.

L'absence de tels facteurs rend délicate l'utilisation de la méthode Bilan Carbone® actuelle à une entreprise qui enverrait ces déchets vers une filière de recyclage en boucle ouverte, toutefois, compte tenu de la diversité des processus envisageables, l'intégration de tels facteurs d'émission dans la méthode Bilan Carbone® dépasse le cadre de la présente étude. Cette section vise cependant à donner les clés qui permettraient d'intégrer ce recyclage.

La méthode des impacts évités est adaptée à la modélisation du recyclage en boucle ouverte.

La figure suivante illustre le système à modéliser pour calculer un facteur d'émission pour le recyclage des plastiques en mélange en palissades, qui se substituerait à des palissades en bois.

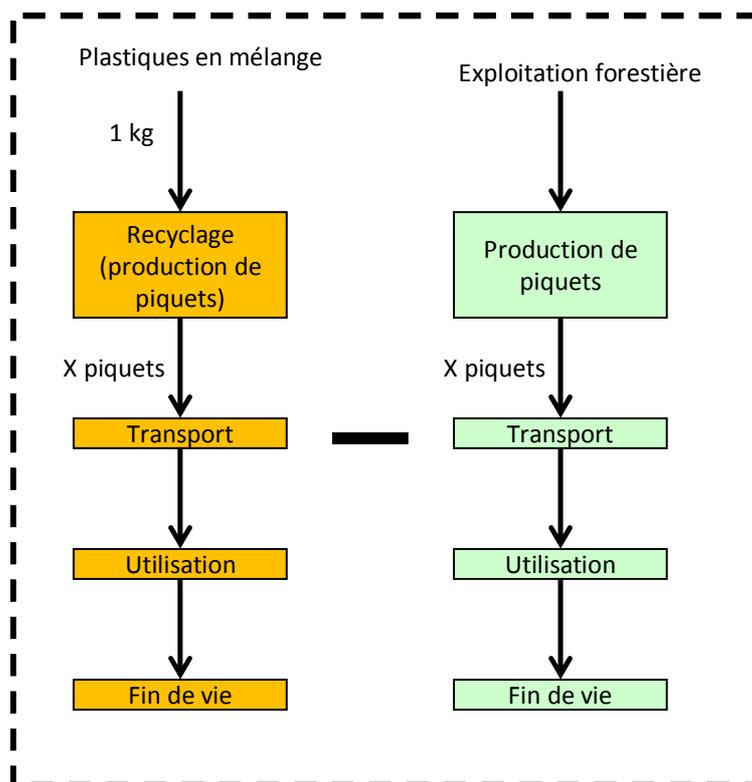


Figure 9 : Système à modéliser pour le calcul des bénéfices du recyclage en boucle ouverte de plastiques en mélange recyclés en palissade

La méthode des impacts évités par la substitution alloue l'ensemble des bénéfices du recyclage à la fin de vie. Les bénéfices sont alloués à l'entreprise qui envoie ses déchets vers la filière de recyclage. L'allocation est donc différente de celle actuellement utilisée dans la méthode Bilan Carbone® (méthode des stocks), où les bénéfices sont intégrés à l'achat de matière première.

Il serait délicat d'allouer partiellement ces bénéfices à l'achat de matériaux recyclés et à l'orientation en fin de vie comme proposé dans le chapitre précédent car cette évolution nécessiterait d'intégrer dans la méthode des produits et non plus des matériaux. Dans ce contexte, si une compilation de facteurs d'émissions pour le recyclage en boucle ouverte est effectuée, nous recommandons d'allouer l'intégralité des bénéfices à la fin de vie.