

ACV recyclage

Mise à jour du rapport d'évaluation environnementale du recyclage en France



Auteurs

Johan LHOTELLIER
Hugo THUNIS

Contact

+32 2 420 28 23
contact@rdcenvironment.be

Document pour

FEDEREC

Date

Juin 2023

Table des matières

Table des matières	3
1 Introduction	7
1.1 Contexte.....	7
1.1.1 Historique.....	7
1.2 Description de la méthodologie d'analyse du cycle de vie.....	8
1.2.1 L'analyse de cycle de vie	8
1.2.2 Méthodologie d'analyse du cycle de vie	9
2 Objectif et Champ de l'étude.....	11
2.1 Objectif de l'étude	11
2.2 Public cible	11
2.3 Revue critique	11
2.4 Les filières étudiées.....	11
2.5 L'unité fonctionnelle.....	12
2.6 Matériaux issus des filières de recyclage.....	13
2.6.1 Terminologie	13
2.6.2 Tonnages totaux collectés.....	13
2.7 Indicateurs environnementaux.....	14
2.7.1 Liste des indicateurs recommandés par la méthode PEF	14
2.7.2 Consommation d'énergie primaire	16
2.7.3 Concept de neutralité carbone	17
2.8 Frontières du système	19
2.9 Méthode de calcul appliquée	20
2.10 Champ géographique et temporel.....	21
2.11 Exigence sur la qualité des données	23
2.12 Critères de coupure	25
3 Calcul de l'inventaire : données et hypothèses.....	27
3.1 Principales sources de données.....	27
3.2 Inventaire de cycle de vie de la chaîne de recyclage de la filière métaux (ferreux et non-ferreux).....	30
3.2.1 Origines et tonnages des flux collectés.....	30
3.2.2 Étapes du cycle de vie incluses dans le système.....	31
3.2.3 Données utilisées pour les étapes de collecte, tri et production des MPR	35
3.2.3.1 Collecte.....	35

3.2.3.2	Tri.....	36
3.2.3.3	Production des MPR.....	37
3.2.4	Données utilisées pour les étapes d'incorporation des MPR et de production vierge..	39
3.2.4.1	Métaux ferreux.....	39
3.2.4.2	Aluminium	40
3.2.4.3	Cuivre.....	41
3.2.4.4	Zinc	42
3.2.4.5	Plomb.....	44
3.3	Inventaire de cycle de vie de la chaîne de recyclage de la filière verre.....	45
3.3.1	Origines et tonnages des flux collectés.....	45
3.3.2	Étapes du cycle de vie incluses dans le système.....	45
3.3.3	Données utilisées pour les étapes de collecte et de production de MPR.....	46
3.3.3.1	Collecte.....	46
3.3.3.2	Production de MPR	47
3.3.4	Données utilisées pour les étapes de d'incorporation des MPR et de production vierge.	47
3.4	Inventaires de cycle de vie de la chaîne de recyclage de la filière papier-carton	49
3.4.1	Origines et tonnages des flux collectés.....	49
3.4.2	Étapes du cycle de vie incluses dans le système.....	49
3.4.3	Données utilisées pour les étapes de collecte, tri et production des MPR	50
3.4.3.1	Collecte.....	50
3.4.3.2	Tri.....	50
3.4.1	Données utilisées pour les étapes d'incorporation des MPR et de production vierge..	51
3.4.1.1	Incorporation des MPR.....	51
3.4.1.2	Production vierge	53
3.5	Inventaires de cycle de vie de la chaîne de recyclage de la filière plastiques	55
3.5.1	Origines et tonnages des flux collectés.....	55
3.5.2	Étapes du cycle de vie incluses dans le système.....	56
3.5.3	Données utilisées pour les étapes de préparations en vue de l'incorporation	56
3.5.4	Données utilisées pour l'étape de production vierge	58
3.6	Inventaires de cycle de vie de la chaîne de recyclage des inertes du BTP.....	59
3.6.1	Étapes du cycle de vie incluses dans le système.....	59
3.6.2	Données utilisées pour les étapes de collecte et de tri initial des DMA.....	60
3.6.3	Données utilisées pour les étapes de tri et préparation (à destination des filières)	60
3.6.4	Données utilisées pour l'étape de production vierge évitée	61
3.7	Inventaires de cycle de vie de la chaîne de recyclage du bois.....	61

3.7.1	Origines et tonnages des flux collectés.....	61
3.7.2	Étapes du cycle de vie incluses dans le système.....	62
3.7.3	Données utilisées pour les étapes de collecte et de tri « manuel »	62
3.7.3.1	Collecte.....	62
3.7.3.2	Tri.....	62
3.7.4	Données utilisées pour l'étape de production des MPR.....	63
3.7.5	Données utilisées pour les étapes de d'incorporation des MPR et de production vierge.	64
3.8	Taux de substitution aux matières premières d'origine vierge	65
3.9	Inventaire de cycle de vie de la collecte et de la fin de vie évitée.....	66
3.9.1	Collecte évitée.....	66
3.9.2	Fin de vie évitée	67
3.9.2.1	Inventaires utilisés pour les traitements finaux évités	68
3.9.2.2	Valorisation énergétique de l'incinération.....	70
3.9.2.3	Dégradation du carbone organique et émissions de méthane biogénique en installation de stockage	71
3.9.2.4	Récupération et valorisation énergétique du méthane des centres de stockage	72
4	Évaluation de la qualité des données	74
4.1	Méthode	74
4.2	Évaluation de la qualité des données	78
4.3	Incertitude associée à la qualité des données.....	80
4.3.1	Méthodologie.....	80
4.3.2	Résultats.....	81
5	Résultats par filière et par tonne	82
5.1	Changement climatique, consommation de ressources fossiles et totale	82
5.2	Utilisation des ressources minérales	88
5.3	Émissions de particules.....	91
5.4	Eutrophisation des eaux marines et des eaux douces.....	94
6	Résultats pour les tonnages collectés par FEDEREC en 2021.....	98
7	Analyses de sensibilité	104
7.1	Influence de la fin de vie évitée sur les résultats.....	104
7.2	Influence du choix d'inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR – Filière aluminium....	107
7.3	Sensibilité de la filière plastique aux inventaires de cycle de vie utilisés.....	108
7.3.1	Inventaires issus du SRP	108
7.3.1.1	Étapes de collecte, tri et préparation des MPR en vue de l'incorporation	108

7.3.1.2	Inventaires pour l'étape de production vierge évitée.....	110
7.3.2	Résultats de la comparaison	111
7.4	Sensibilité de la filière plastique au matériau évité.....	113
7.5	Sensibilité de la filière bois à la part d'énergie biosourcée utilisée en étape de production vierge évitée	115
8	Conclusions	116
9	Références bibliographiques	122
10	Table des tableaux	124
11	Table des figures	127
12	Annexes.....	129

1 Introduction

1.1 Contexte

FEDEREC, la Fédération professionnelle des entreprises du recyclage, représente 1200 acteurs du secteur du recyclage sur l'ensemble du territoire français. Comptant parmi ses membres des entreprises, multinationales, ETI et PME, la fédération couvre les activités de collecte, de tri, de valorisation matière des déchets industriels et ménager ou de négoce/courtage de Matières Premières issues du Recyclage (MPR).

Avec 43 Mt de déchets collectés en France pour recyclage en 2021¹, FEDEREC représente des entreprises jouant un rôle prédominant dans l'économie circulaire et il est donc indispensable de connaître le bilan environnemental de leur activité.

Cette démarche d'amélioration des connaissances des impacts environnementaux du recyclage des déchets a débuté pour FEDEREC en 2017 avec une première évaluation environnementale du recyclage en France selon la méthode d'analyse du cycle de vie (ACV). Cette étude, au nombre d'indicateurs restreint (changement climatique et consommation d'énergie primaire) n'a pu être considérée comme conforme à la norme ISO 14044. C'est dans ce cadre qu'une mise à jour a été jugée nécessaire sur base des données d'activité de 2021.

1.1.1 Historique

2015 – 2017 :

- FEDEREC commandite (avec le soutien de l'ADEME) l'évaluation environnementale du recyclage en France selon la méthode ACV
 - Une revue critique, réalisée par le bureau Deloitte, est finalisée en avril 2017.
 - La revue critique conclue que le rapport final daté du 20 avril 2017 est complet, précis et transparent à ceci près que l'étude ne peut être conforme à la norme ISO 14044 du fait du nombre trop restreint d'indicateurs (changement climatique et consommation d'énergie primaire). La revue critique recommande également d'étendre le nombre de filière de recyclage et de faire appel à un comité de revue critique (3 membres) plutôt qu'un seul expert ACV.
- À cette étude est associé un outil permettant à FEDEREC de mettre à jour les résultats en fonction des évolutions annuelles de tonnages. Il permet aux adhérents de calculer les impacts et bénéfices environnementaux associés à leurs activités.
- Les filières couvertes par cette étude sont les suivantes :
 - Ferrailles, Cuivre, Aluminium, Papier/carton, Verre, Plastiques d'emballage (Polyéthylène téréphtalate (PET) / Polyéthylène haute densité (PEhd)), Granulats, Textiles (chiffons)

2017 :

- L'ADEME utilise l'étude FEDEREC pour calculer les impacts environnementaux du Bilan National du Recyclage (BNR) données 2014
 - L'étude est étendue de manière simplifiée à d'autres flux

¹ FEDEREC, chiffres clés du recyclage (2022)

- L'étude est étendue à d'autres indicateurs
- Ce travail ne fait pas l'objet d'une revue critique

2019 :

- L'ADEME commande une nouvelle analyse du cycle de vie sur le recyclage pour accompagner le bilan national du recyclage données 2017
 - L'étude est réalisée pour les 16 indicateurs d'impacts recommandés par la Commission européenne
 - L'étude est revue critiquée par un panel d'expert et est qualifiée conforme à la norme ISO 14 044

2021 :

- L'ADEME commande une mise à jour des résultats avec les données BNR 2019
 - Il n'y a pas de mise à jour de la modélisation. Les résultats sont adaptés avec les tonnages du BNR 2019.

Le présent rapport se base sur les travaux précédents et en particulier sur la modélisation établie pour le BNR de l'ADEME avec les tonnages 2017/2019.

1.2 Description de la méthodologie d'analyse du cycle de vie

1.2.1 L'analyse de cycle de vie

L'analyse du cycle de vie (ACV) est l'outil le plus abouti en matière d'évaluation globale et multicritère des impacts environnementaux. Cette **méthode normée** permet de mesurer les effets quantifiables de produits ou de services sur l'environnement.

C'est un outil d'aide à la décision. Ses résultats peuvent être utilisés pour des besoins d'écoconception², d'affichage environnemental ou encore d'orientation des politiques publiques. L'objectif de l'ACV est de présenter une vision globale des impacts potentiels générés par les produits (biens, services ou procédés) tout au long de la vie d'un produit, c'est à dire de la production des matières premières jusqu'à sa gestion en fin de vie (on parle alors d'analyse du « berceau à la tombe » ou *cradle-to-grave*).

Un produit est fabriqué à partir de matières premières et d'énergie, il est utilisé, puis géré en fin de vie. L'ACV établit un bilan quantitatif de tous les flux entrants (eau, énergie, matières premières) et sortants (eau, air, déchets), à chaque étape du cycle de vie d'un produit. Ceci permet d'identifier un grand nombre d'impacts (ou pollutions) sur l'environnement.

C'est une méthode d'évaluation **multi-étapes** (production des matières premières, transport, fabrication du produit, distribution, utilisation et fin de vie) et **multicritères** (impacts sur les écosystèmes, impacts sur les ressources et impacts sur la santé).

² Prise en compte du critère environnemental pour améliorer la performance environnementale d'un produit ou d'un service tout au long de son cycle de vie

Utilisée comme outil d'écoconception, elle permet d'identifier les éventuels transferts de pollution d'une phase de cycle de vie à une autre et/ou d'un indicateur environnemental à un autre lorsque diverses solutions sont envisagées.

1.2.2 Méthodologie d'analyse du cycle de vie

L'ACV est un processus itératif (chaque étape peut nous amener à revoir les précédentes) et comprend quatre phases :

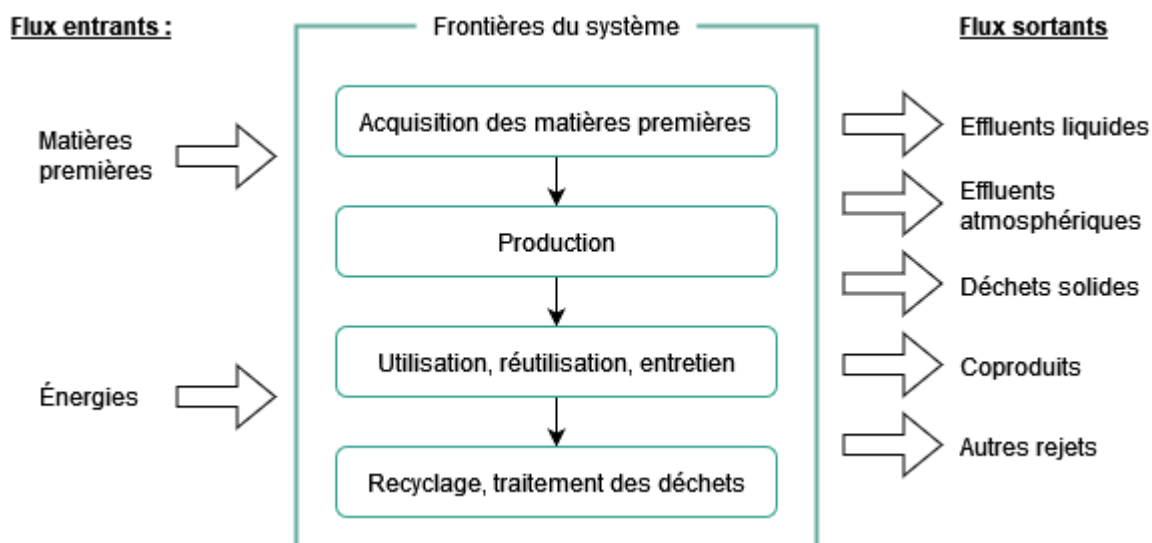
1. Définition des objectifs et du champ de l'étude
2. Inventaire
3. Évaluation de l'impact
4. Interprétation

La phase 1 permet de définir quels sont les objectifs de l'ACV, en précisant quelle(s) application(s) il en sera fait : écoconception, comparaison de produits ou services ou déclaration environnementale. La cible de l'étude est précisée à ce stade, ainsi que la manière dont seront divulgués les résultats (pour des affirmations comparatives par exemple). Le champ de l'étude doit par ailleurs préciser les fonctions du produit étudié, l'unité fonctionnelle choisie (voir ci-dessous), les frontières du système étudié (étapes/procédés à prendre en compte, cf. phase 2) et les limites de l'étude (méthodologiques en grande partie). C'est aussi à ce stade que les différentes règles pour les calculs appliqués à l'étude seront arrêtées.

À **la phase 2**, chaque système est décomposé en plusieurs **procédés unitaires**. Chacun de ces procédés correspond à une action précise dans la filière. Ces procédés mis bout à bout conduisent à l'élaboration d'un **arbre de procédés** pour chaque système.

Chaque procédé unitaire est caractérisé par une multitude de flux élémentaires entrants et sortants (CO₂, SO₂, NO_x, PO₄, minerais, etc.) généralement issu d'une collecte de données permettant de déterminer les intrants (consommation d'eau, d'énergie, de matières premières, etc.) et les sortants (émissions dans l'air, dans l'eau, les sols, déchets et produits et co-produits générés par le processus). **On appelle cette démarche « inventaire du cycle de vie »**. L'inventaire est donc une comptabilité analytique des flux.

Figure 1-1 : Diagramme de flux de l'analyse du cycle de vie



Une fois les procédés identifiés, leur intégration va permettre de reconstituer l'ensemble de la chaîne. La construction de l'arbre des procédés est progressive et part de l'**Unité Fonctionnelle** (fonction remplie par le système étudié, ex : « emballer 1 litre de marchandises »).

Lors de l'évaluation des impacts (**phase 3**), les différents flux sont regroupés par catégories d'impacts (ex. : changement climatique) selon leur contribution à un problème/enjeu environnemental. Pour chaque catégorie d'impacts, des **facteurs de caractérisation** spécifiques sont appliqués à chaque valeur de flux afin de traduire un effet sur l'environnement dans une unité commune (par exemple, pour l'indicateur de contribution au changement climatique, le kg de CO₂-eq émis est retenu comme unité commune). Les indicateurs d'impacts sur l'environnement peuvent ainsi être évalués.

Tableau 1-1 : Exemple simplifié de caractérisation des impacts pour la catégorie d'impacts « changement climatique »

Flux	Inventaire	Facteurs de caractérisation ³	Résultats caractérisés
<i>Unité</i>	<i>kg / unité fonctionnelle</i>	<i>kg CO2-eq/flux</i>	<i>en kg CO2-eq</i>
CO₂	1.2	1	1.2 (1.2 x 1)
CH₄	0.01	36	0.36 (0.01 x 36)
N₂O	0.0017	298	0.51 (0.0017 x 298)
Total	-	-	2.07 (1.2+0.36+0.51)

Lors de l'interprétation des résultats (**phase 4**), les phases du cycle de vie et les flux qui contribuent le plus aux indicateurs d'impacts environnementaux sont identifiés. Des actions peuvent être menées afin de prévenir ou limiter les impacts. L'approche ACV, multicritères, permet d'identifier les transferts de pollutions (d'une catégorie d'impact vers une autre et d'une phase du cycle de vie vers une autre) et d'en tenir compte lors de la prise de décision.

³ Source : IPCC 2017 direct 100 ans (facteurs publiés par la Commission Européenne : paquet EF 3.0)

2 Objectif et Champ de l'étude

2.1 Objectif de l'étude

Ce rapport accompagne la publication de FEDEREC des tonnages de déchets collectés et recyclés en France en 2021⁴.

L'analyse des impacts environnementaux du recyclage est réalisée selon une approche d'analyse du cycle de vie (ACV) en suivant les normes ISO 14040 et 14044. La conformité à ces normes ne peut être établie qu'à l'issue d'un processus de revue critique qui n'a pas été réalisé pour la présente étude.

Ce rapport s'appuie grandement sur le rapport produit par RDC Environnement pour l'ADEME en 2019 : « ADEME. J.Lhotellier. 2019. Analyse du cycle de vie des flux de déchets recyclés sur le territoire français – Rapport. 142 pages. »

2.2 Public cible

Cette étude est commanditée par FEDEREC et a pour objectif d'être rendue publique : le rapport et les conclusions de l'étude sont mis à disposition du grand public.

2.3 Revue critique

Aucune revue critique n'est prévue à ce jour.

2.4 Les filières étudiées

Le Tableau 2-1 ci-dessous présente l'évolution des filières étudiées dans le cadre de cette mise à jour :

Tableau 2-1 : Évolution des filières de recyclage étudiées

Filière	Matériau	Rapport FE- DEREC 2017	Rapport BNR 2019	Rapport FE- DEREC 2023
Métaux ferreux (MF)	Acier	X	X	X
	Aluminium	X	X	X
Métaux non-ferreux (MNF)	Cuivre	X	X	X
	Zinc (<i>hors poussières d'aciérie</i>)		X	X
	Plomb		X	X
Verre	Verre d'emballage	X	X	X

⁴ FEDEREC, chiffres clés du recyclage (2022)

	Verre plat		X	X
Papier/carton		X	X	X
Inertes du BTP⁵	<i>(Selon la nomenclature européenne)</i>	X	X	X
Plastiques	Polyéthylène téréphtalate (PET)	X	X	X
	Polyéthylène haute densité (PEhd)	X	X	X
	Polyéthylène basse densité (PEbd)		X	X
	Polystyrène (PS)		X	X
	Polypropylène (PP)		X	X
	Polychlorure de Vinyle (PVC)		X	X
Bois			X	X
Textiles	Chiffons	X		

Les filières présentées dans le tableau ci-dessus peuvent être alimentées par différentes sources : déchets collectés auprès des industriels, déchets apportés par les ménages ou les entreprises en déchèterie, déchets issus des collectes sélective...

La liste des filières étudiées dans cette mise à jour se calque donc sur le BNR 2019 et les textiles sortent donc du champ de l'étude⁶.

2.5 L'unité fonctionnelle

L'Unité Fonctionnelle (UF) définit précisément la fonction qui est remplie par le système étudié et pour laquelle les impacts environnementaux vont être quantifiés. Cette unité est définie à partir de l'objectif de l'étude.

Dans le cadre de cette mise à jour, l'unité fonctionnelle inchangée est :

Analyse de la collecte, du tri et de la transformation d'une tonne de déchets afin de produire des matériaux intermédiaires issus de MPR en substitution de matériaux intermédiaires issus de ressources vierges

⁵ BTP : Bâtiment et travaux publics

⁶ Les résultats ACV de la filière textiles sont notamment disponibles via l'étude Refashion : *Analyse environnementale de la filière des textiles et linges de maison usagés, septembre 2022*

Les flux de référence concernés sont les déchets collectés et triés en France. Le périmètre géographique de la suite des étapes de production pour arriver aux matériaux intermédiaires issus de MPR dépend des exportations annuelles (cf. 2.10 *Champ géographique et temporel*).

2.6 Matériaux issus des filières de recyclage

2.6.1 Terminologie

Les trois terminologies utilisées dans ce rapport, précisant l'état de la matière pendant les étapes successives du recyclage, sont :

- Les matériaux à recycler : les déchets.
- Les matières premières de recyclage (MPR) : les matériaux obtenus à partir des déchets après diverses opérations de recyclage (essentiellement mécaniques comme le broyage, le cisailage et le tri) et peuvent être réintroduites dans les processus de production de produits neufs en substitution totale ou partielle de matières premières vierges.
- Dans le cas de plastiques, la MPR est la matière prête à être introduite dans un processus de production, avec ou sans « compoundage » (i.e. avec ou sans mélange avec d'autres substances telles que des charges, des colorants, etc.).
- Les matériaux intermédiaires issus de MPR : les matériaux transformés à partir de la matière première de recyclage (MPR) (étape autrement appelée : Consommation de MPR).

Le choix des matériaux intermédiaires s'est fait en fonction de trois objectifs :

1. Être comparable aux matières premières vierges, c'est-à-dire que le niveau de transformation des matériaux intermédiaires issus de MPR doit être équivalent à celui des matières premières vierges ;
2. Être représentatif de la filière du recyclage des déchets collectés en France (description de la filière réalisée en concertation avec les experts de FEDEREC) ;
3. Disposer d'une donnée fiable, représentative de la filière et la plus à jour possible.

2.6.2 Tonnages totaux collectés

Tableau 2-2 : Tonnages totaux collectés – Chiffres FEDEREC 2021 (pour les matériaux retenus dans l'étude)

Filière de recyclage	Tonnage collecté
Métaux ferreux	12 900 kt
Aluminium	551 kt
Cuivre	245 kt
Plomb	347 kt
Zinc	143 kt
Papier-carton	6 874 kt
Verre	2 518 kt
Plastiques (Pehd, Pebd, PET, PS, PP et PVC)	906 kt
Inertes du BTP	11 500 kt
Bois hors palettes	7 157 kt
Total	43 141 kt

2.7 Indicateurs environnementaux

Les indicateurs sélectionnés pour la mise à jour de l'évaluation environnementale du recyclage en France sont les 16 catégories d'impacts recommandées par la Commission européenne (à travers la méthode PEF⁷). La version EF 3.0 est utilisée.

L'analyse est complétée avec l'indicateur de flux « Consommation d'énergie primaire ». Cet indicateur vient compléter les 16 catégories d'impacts susmentionnées puisqu'il prend en compte la consommation de ressources énergétiques renouvelables (bois, solaire, éolien, hydraulique) et non renouvelables (pétrole, charbon, gaz, nucléaire) alors que seule l'utilisation de ressources non renouvelables est en compte parmi les catégories d'impact recommandés par la Commission européenne.

2.7.1 Liste des indicateurs recommandés par la méthode PEF

Les catégories d'impacts potentiels étudiées et listées en Tableau 2-3 sont les catégories d'impacts recommandées et diffusées par le Joint Research Centre (JRC) de la Commission européenne. Les modèles de caractérisation « *midpoint* » recommandés sont diffusés dans le document « *Commission recommendation of 16.12.2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life, Annex 1 - Product Environmental Footprint Method* ».

Tableau 2-3 : Catégories d'impacts potentiels étudiées

Catégorie d'impact	Indicateur	Unité	Méthode LCIA recommandée par défaut	Classification
Changement climatique	Potentiel de réchauffement global (PRG 100)	kg CO ₂ eq	Bern model - Global warming potentials (GWP) over a 100-year time horizon (based on IPCC 2013)	I
Appauvrissement de la couche d'ozone	Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique (ODP)	kg CFC-11 eq	EDIP model based on the ODPs of the World Meteorological Organisation (WMO) over an infinite time horizon (WMO 2014 + integrations)	I
Toxicité humaine - effets cancérogènes	Unité toxique comparative potentielle pour les êtres humains, ETP-c	CTUh	based on USEtox2.1 model (Fantke et al. 2017), adapted as in Saouter et al., 2018	III
Toxicité humaine – effets non-cancérogènes	Unité toxique comparative potentielle pour les êtres humains, ETP-nc	CTUh	based on USEtox2.1 model (Fantke et al. 2017), adapted as in Saouter et al., 2018	III
Émissions de particules fines (impact sur la santé humaine)	Incidence potentielle de maladies dues aux émissions de particules fines	Incidence de maladies	PM model (Fantke et al., 2016 in UNEP 2016)	I

⁷ Commission recommendation of 16.12.2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life, Annex 1 - Product Environmental Footprint Method

Rayonnement ionisant, santé humaine	Efficacité potentielle de l'exposition humaine à l'isotope U235, PIR	kBq U235 eq	Human health effect model as developed by Dreicer et al. 1995 (Frischknecht et al, 2000)	II
Formation d'ozone photochimique	Potentiel de formation d'ozone troposphérique, POCP	kg NMVOC eq	LOTOS-EUROS model (Van Zelm et al, 2008) as applied in ReCiPe 2008	II
Acidification	Potentiel d'acidification des dépassement cumulé, AP	mol H+ eq	Accumulated exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophisation terrestre	Potentiel d'acidification, dépassement cumulé, EP terrestre	mol N eq	Accumulated exceedance (Seppälä et al. 2006, Posch et al, 2008)	II
Eutrophisation aquatique, eaux douces	Potentiel d'eutrophisation, fraction d'éléments nutritifs atteignant le compartiment final eaux douces, EP eaux douces	kg P eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Eutrophisation aquatique marine	Potentiel d'eutrophisation, fraction d'éléments nutritifs atteignant le compartiment final eaux douces, EP marine	kg N eq	EUTREND model (Struijs et al, 2009) as implemented in ReCiPe	II
Écotoxicité (eaux douces)	Unité toxique comparative potentielle pour les écosystèmes, ETP-f	CTUe	based on USEtox2.1 model (Fantke et al. 2017), adapted as in Saouter et al., 2018	III
Utilisation des terres	Indice potentiel de qualité des sols (SQP)	Points ⁸	Soil quality index based on LANCA model (De Laurentiis et al. 2019) and on the LANCA CF version 2.5 (Horn and Maier, 2018)	III
Utilisation de l'eau	Potentiel de privation en eau (des utilisateurs), consommation d'eau pondérée en fonction de la privation (WDP)	m ³ de privation eq	Available Water REmaining (AWARE) model (Boulay et al., 2018; UNEP 2016)	III
Utilisation des ressources abiotiques – minéraux et métaux	Potentiel d'utilisation pour les ressources abiotiques non fossiles, ADP – minéraux + métaux	kg Sb eq	van Oers et al., 2002 as in CML 2002 method, v.4.8	III
Utilisation des ressources abiotiques – combustibles fossiles	Potentiel d'utilisation pour les ressources abiotiques fossiles, ADP- fossiles	MJ	van Oers et al., 2002 as in CML 2002 method, v.4.8	III

⁸ Pondération de 4 indicateurs : production biotique, résistance à l'érosion, filtration mécanique et recharge de la nappe phréatique

La classification selon la robustesse déterminée par le JRC est la suivante :

I	Recommandé et satisfaisant
II	Recommandé, mais qui a besoin d'améliorations
III	Recommandé, mais à appliquer avec prudence

La méthode AWARE (Available WATER REmaining) pour l'évaluation de l'utilisation de la ressource en eau s'applique sur la consommation d'eau nette (consommations – émissions vers le même milieu) régionalisée. Les inventaires de cycle de vie ne sont généralement pas régionalisés, c'est le cas de la base de données Ecoinvent qui est majoritairement utilisée mais également de la plupart des inventaires de cycle de vie des associations ou fédérations utilisés dans cette étude. Dans ce cas, le facteur de caractérisation moyen européen est appliqué.

Selon des porte-paroles de l'industrie du papier, la méthode LANCA ne permet pas de refléter les différentes pratiques de gestion forestière et les pratiques agricoles : des pratiques d'aménagement forestier ont été élaborées pour protéger et maintenir les services écosystémiques dans les forêts et les plantations aménagées. De plus, les systèmes volontaires de certification pour garantir une gestion responsable des forêts ont été conçus pour tenir compte des pratiques pertinentes qui contribuent à la protection des sols et des services écosystémiques tels que ceux rendus par la biodiversité.

La certification forestière ne traduit cependant pas une absence d'impact sur l'usage des sols (par exemple, impacts éventuels des changements des pratiques sylvicoles liés à une demande accrue en matières premières vierges). L'indicateur LANCA a été utilisé dans ce but mais il ne suffit pas pour évaluer ces impacts. Les résultats, présentés en Annexe 2 pour cet indicateur, doivent être lus avec précaution. Par ailleurs, cet indicateur est exclu des indicateurs pertinents détaillés dans le corps du rapport.

2.7.2 Consommation d'énergie primaire

La méthodologie utilisée pour évaluer la consommation d'énergie primaire (ou consommation d'énergie cumulée) est une méthode d'inventaire des flux énergétiques (ressources renouvelables et fossiles).

La demande d'énergie représente la consommation d'énergie directe et indirecte⁹ tout au long du cycle de vie, y compris l'énergie consommée lors de l'extraction, de la production et l'élimination des matières premières et auxiliaires. Les facteurs de caractérisation sont divisés en cinq catégories : *l'énergie non renouvelable fossile, l'énergie non renouvelable nucléaire, l'énergie renouvelable issue de la biomasse, l'énergie renouvelable issue de l'eau et l'énergie renouvelable issue du vent, de la géothermie et du soleil.*

⁹ Par indirecte, il faut comprendre : le contenu énergétique des matières premières utilisées à des fins non énergétiques (ex. : déchets de bois dans l'industrie de production de papier vierge, valorisé en tant que ressources énergétique)

2.7.3 Concept de neutralité carbone

Les émissions de carbone dans l'atmosphère sont communément réparties en deux catégories :

- les émissions dites fossiles, faisant partie du cycle long du carbone (issues de la combustion d'hydrocarbures stockés depuis des millions d'années sous la surface terrestre),
- les émissions dites biogéniques, issues du cycle court du carbone et faisant intervenir la photosynthèse des végétaux, gérés de façon durable (i.e. non soumis à la déforestation) ou non.

Le carbone biogénique (ou biomasse) est le carbone capté par la biomasse ou émis lors d'un processus de décomposition naturelle ou de combustion de cette biomasse. Selon les étapes du cycle de vie d'un produit, le carbone biogénique peut être :

- capté par la matière (croissance de la biomasse),
- émis dans l'atmosphère (combustion ou dégradation du produit).
- stocké dans les écosystèmes (sols et forêts) ou dans la matière (en fonction de la durée de vie ou de conservation du produit) et par conséquent ôté provisoirement de l'atmosphère.

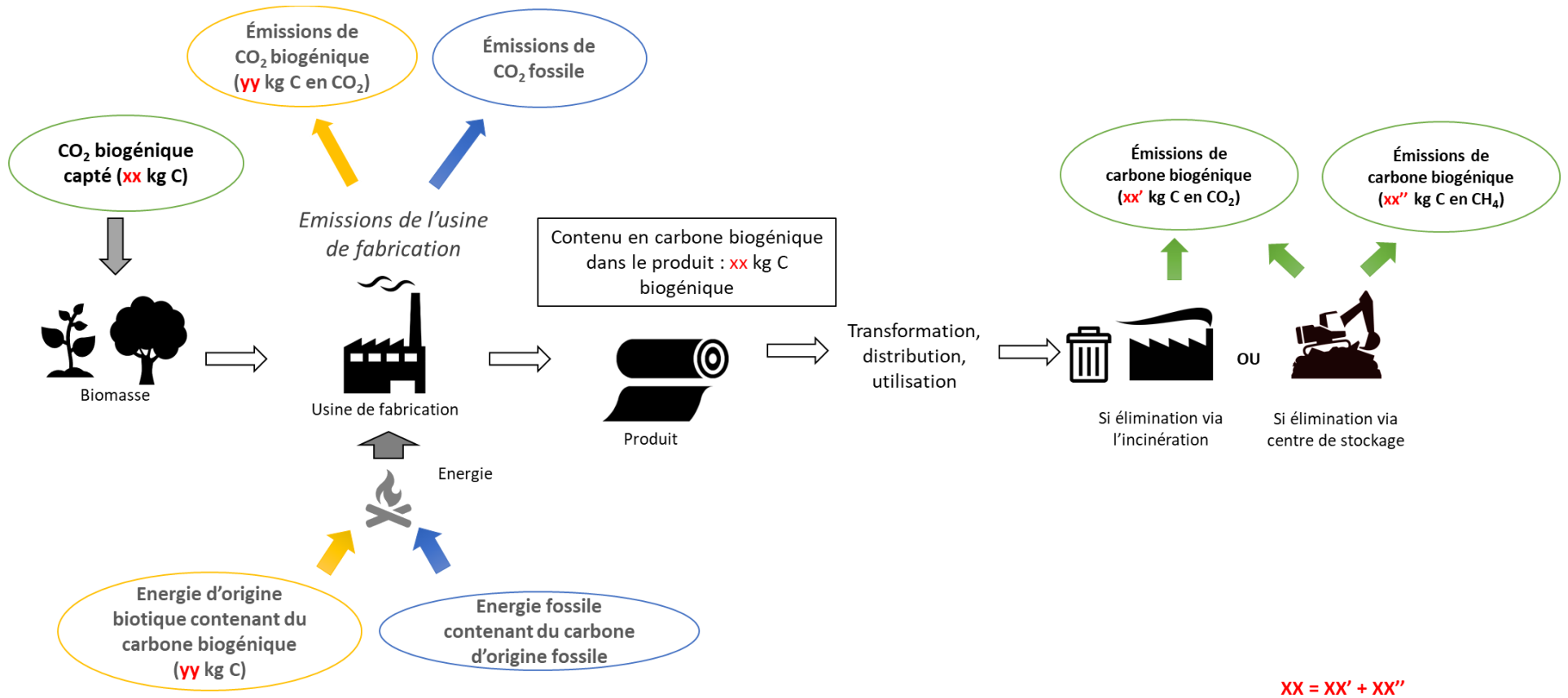
Avec la méthode choisie en lien avec les préconisations actuelles de la Commission européenne, **le cycle de carbone biogénique est considéré comme neutre à l'exception la situation suivante :**

- **Une partie du carbone est émise sous forme de méthane : dans cette étude, c'est le cas lors de l'enfouissement.**

Le papier, le carton (produits dérivés du bois) et le bois présentent un potentiel de stockage carbone sur la période de leur durée de vie. Cependant, comme le rappelle la norme ISO 14067 : 2018 pour la comptabilisation par défaut du carbone biogénique, les émissions et les captations de GES sont incluses comme si elles avaient lieu au début de la période d'évaluation. Il n'y a donc pas de décalage des émissions dans le temps.

Par ailleurs, la norme ISO 14 067 : 2018 souligne que la contribution du carbone biogénique à « l'empreinte carbone d'un produit (ECP) » est nulle : « Dans le cas de produits issus de la biomasse, le stockage du carbone est calculé en tant que captation du carbone lors de la croissance du végétal, suivie de son émission si le carbone biogénique est libéré lors des étapes d'utilisation et de fin de vie. Si la captation du carbone dans l'atmosphère est incluse dans les frontières du système, les flux de carbone biogénique vers et hors des matières dérivées de la biomasse qui sont brûlées dans le cadre du scénario de fin de vie se solderont par une contribution nette à l'ECP nulle, hormis pour la portion de carbone biogénique convertie en CH₄. Si le produit est réutilisé ou recyclé dans le cadre du scénario de fin de vie, cela peut également se solder par une contribution nette à l'ECP nulle, car les flux de carbone biogénique sont transférés aux systèmes de produits ultérieurs ».

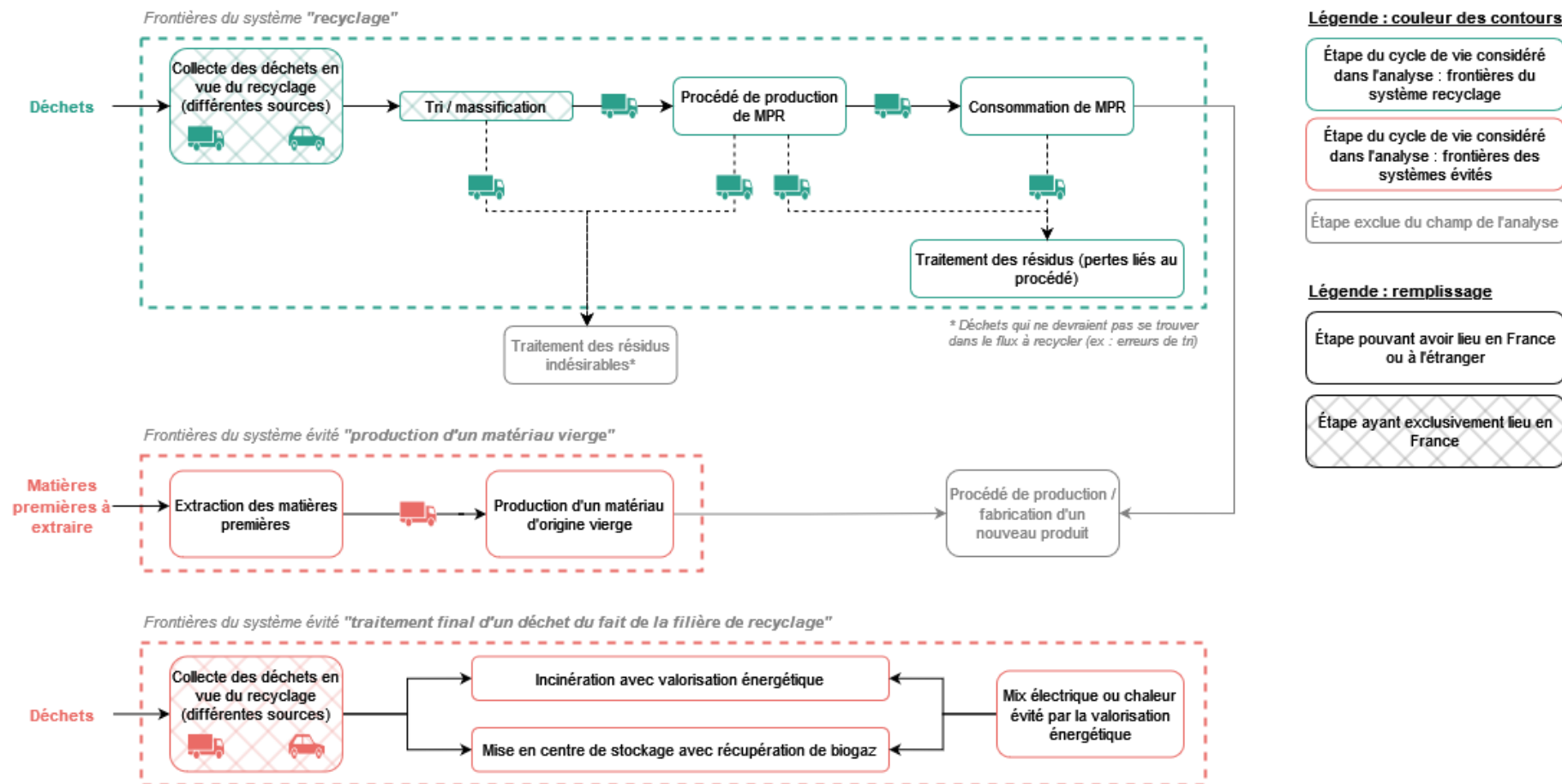
Figure 2-1 : Représentation simplifiée du cycle du carbone biogénique – $xx = xx' + xx''$



2.8 Frontières du système

Le périmètre de l'étude, commun à toutes les filières de recyclage, est présenté dans la Figure 2-2 ci-dessous :

Figure 2-2 : Frontières du système



Ce périmètre nous permet d'évaluer les impacts tout au long de la chaîne de recyclage mais aussi de définir quelle serait la situation en cas d'absence de cette filière de recyclage : c'est-à-dire, quelle est la collecte évitée, la fin de vie évitée et la production évitée de matières premières vierges.

Le scénario de fin de vie des résidus est considéré comme identique avec ou en l'absence de filière de recyclage.

La nature des pertes issues du procédé de production de matières premières de recyclage est identique à la matière traitée sauf indication contraire dans le chapitre sur la description des données utilisées (cf. chapitre 3).

La nature des pertes et plus globalement des déchets générés par le procédé de production des matériaux intermédiaires, ainsi que leur traitement, sont intégrés dans l'inventaire de cycle de vie utilisé.

Les déchets collectés en vue de leur recyclage peuvent contenir :

- des souillures issues de leur utilisation antérieure (résidus des produits contenus dans les emballages par exemple),
- des déchets autres que ceux destinés à être recyclés (erreurs de tri des ménages par exemple),
- ainsi qu'un taux d'humidité variable selon la contamination du flux de déchets.

Ces éléments sont considérés sur tout le cycle de vie du déchet à travers ce qui est appelé « taux de pertes » ou « taux d'indésirables » (pour une phase de tri par exemple) ainsi qu'à travers la « masse de déchets nécessaire pour la production d'une tonne de matériaux intermédiaires issus de MPR »¹⁰. Des valeurs moyennes par phase de cycle de vie sont utilisées (étape de tri et étapes de production des MPR et matériaux intermédiaires), il n'est cependant pas possible de détailler les éléments conduisant à ces valeurs (ex : contribution des indésirables par rapport au taux d'humidité sur le taux de pertes global en centre de tri).

2.9 Méthode de calcul appliquée

Le recyclage remplit deux fonctions :

- c'est un mode de traitement des déchets,
- c'est un mode de production de matière première de recyclage.

Les impacts d'une filière de recyclage se calculent donc de la façon suivante :

$$ER_{\text{amont}}/\rho_1 - EV \cdot \sigma_1 - ED_{\text{aval}}$$

Avec

$$ED_{\text{aval}} = I \cdot (E_i - r_1 n \cdot PCI \cdot E_{\text{chaleur}} - r_2 n \cdot PCI \cdot E_{\text{élec}}) + (1-I) E_d$$

- **ER_{amont}** Émissions spécifiques et ressources consommées du fait du recyclage de la matière recyclée, y compris les processus de collecte, de tri et de transport ;
- **ρ₁** Rendement de recyclage du process permettant de produire la matière recyclée ;
- **EV** Impacts liés à l'extraction ou production de la matière première brute + impacts liés à la transformation de la matière brute en matière première vierge ;

¹⁰ Ce dernier paramètre considère d'autres facteurs comme le taux d'oxydation du matériau à recycler par exemple

- σ_1 Taux de substitution entre la matière recyclée et la matière vierge ;
- ED_{aval} Émissions spécifiques et ressources consommées du fait de l'élimination des déchets de matière à la fin de la vie du produit analysé (par ex. mise en décharge, incinération, pyrolyse) ;
- I Taux national d'incinération des ordures ménagères ou des déchets industriels non recyclés ;
- E_i Impacts liés à la collecte des déchets incinérés + impacts liés à l'incinération du matériau ;
- r_{1n} Rendement lié à la production de chaleur dans les usines d'incinération des ordures ménagères ou des déchets industriels ;
- r_{2n} Rendement lié à la production d'électricité dans les usines d'incinération des ordures ménagères ou des déchets industriels ;
- PCI Pouvoir calorifique inférieur du matériau incinéré ;
- $E_{chaleur}$ Impacts moyens nationaux de la production de chaleur par unité d'énergie produite ;
- $E_{élec}$ Impacts moyens nationaux de la production d'électricité par unité d'énergie produite ; E_d Impacts liés à la collecte des déchets mis en décharge + impacts liés à la mise en décharge (avec récupération du biogaz).

Le coefficient σ_1 permet de prendre en compte les changements de qualité du matériau. Lorsqu'un matériau est recyclé, le matériau d'origine peut subir une perte en quantité et en qualité, ce qui nécessite une compensation pour remplir la même fonction. Cette valeur traduit une perte de qualité technique du matériau d'origine recyclé (par exemple : une résistance moindre des fibres de carton ou des films plastiques d'origine recyclés).

2.10 Champ géographique et temporel

Le scope géographique considéré est la France pour la collecte des déchets et le tri/regroupement.

La production des MPR et des matériaux intermédiaires est fonction de la destination des déchets collectés. Le scope géographique est donc variable selon les années. On peut cependant indiquer qu'il s'articule autour de trois grandes zones géographiques : France (mix énergétique français), Europe (mix énergétique européen) et hors Europe (mix énergétique mondial). Pour l'année 2021, la destination des déchets est exposée dans le Tableau 2-4 ci-dessous.

Tableau 2-4 : Répartition des tonnages vendus selon la destination – Chiffres FEDEREC 2021

Filière	France	Intercommunautaires UE	Hors UE
Métaux ferreux	58 %	36 %	6 %
Métaux non-ferreux	41 %	54 %	5 %
Verre	84 %	16 %	0 %
Papier / Carton	60 %	35 %	5 %
Plastiques	54 %	41 %	5 %
Inertes du BTP	100 %	0 %	
Bois	60 %	40 %	

Au cours de cette étude, une limite importante a été soulevée par cette modification des mix énergétiques en fonction de la destination des tonnages vendus.

En effet, les précédentes études ACV portant sur le recyclage ont démontré que les étapes d'incorporation des MPR et de production de matière vierge évitée présentent une forte influence sur les résultats. Il est donc indispensable de modéliser ces étapes sur un périmètre géographique cohérent.

Dans le cas d'une modélisation de la production vierge évitée dans la même zone géographique que l'incorporation, deux enjeux principaux sont à discuter :

- approche attributionnelle pure : il n'est pas possible de démontrer que le recyclage d'une tonne d'acier en France évitera la production vierge d'une tonne d'acier en France ;
- avantages à l'export : l'export et le recyclage de déchets dans des zones géographique dont le mix énergétique est fortement carboné permettrait dès lors un évitement d'une production vierge aux impacts environnementaux élevés (donc indirectement un grand bénéfice au recyclage).

Dans le cadre de cette mise à jour et aux fins de répondre à ces enjeux, il a été choisi de considérer un champs géographique européen pour ces deux étapes. La principale raison est que le marché des matériaux (vierge ou d'origine recyclée) est à minima européen. Selon la zone géographique, ce choix a les conséquences suivantes :

- la production de matériau vierge évitée hors-Europe avantage la filière recyclage (production vierge, modélisée avec le mix asiatique, plus carbonée que le mix européen ou français) ;
- la production de matériau vierge évitée en France diminue les bénéfices du recyclage par rapport à l'utilisation d'un mix électrique européen ou asiatique.

La représentativité géographique est souvent dépendante de l'inventaire de cycle de vie utilisé. Dans le cas des inventaires issus de la base de données Ecoinvent, il est possible, à minima, d'adapter le mix électrique à la situation étudiée. Pour les autres inventaires (issus des fédérations), il n'est pas possible de désagréger les données et modifier le mix électrique¹¹.

La représentativité temporelle des données utilisées est détaillée tout au long de ce rapport, on peut cependant indiquer que :

- La période temporelle des **données d'activité** correspond à la période pour laquelle les données sont collectées.
- La représentativité temporelle des **données d'inventaires de cycle de vie (ICV)** est variable en fonction des bases de données utilisées (ICV issus majoritairement d'Ecoinvent ou de fédérations/associations).

Les critères de priorisation des inventaires de cycle de vie et des données d'activité sont les suivants :

- **Représentativité temporelle** : donnée la plus à jour possible
- **Représentativité géographique** : France puis Europe
- **Représentativité technologique** : la technologie représentée dans la donnée d'inventaire doit correspondre à la technologie employée par l'industrie. (exemple : la norme Euro du camion modélisée correspond à la norme Euro employée par le logisticien)

¹¹ C'est le cas des métaux ferreux, du zinc, du plomb et du cuivre.

2.11 Exigence sur la qualité des données

Conformément à la norme ISO 14 044 une évaluation de la qualité des données est effectuée selon les critères suivants :

- Représentativité temporelle,
- Représentativité géographique,
- Représentativité technologique,
- Complétude de l'inventaire,
- Cohérence méthodologique et fiabilité des données.

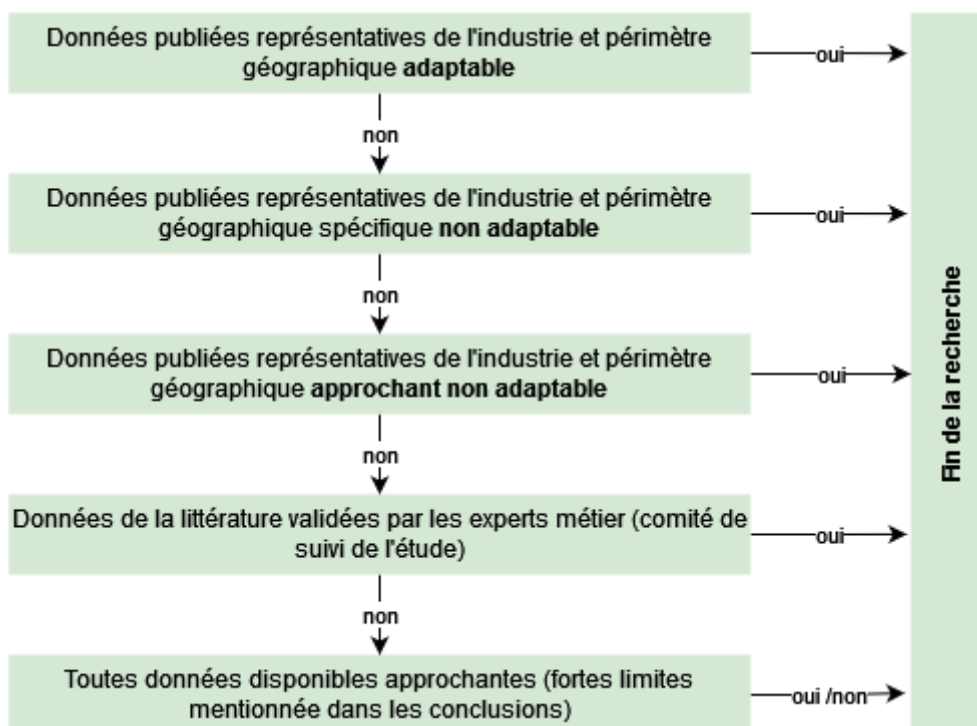
Exigences relatives à la représentativité temporelle, géographique et technologique :

Les données d'inventaires privilégiées sont les plus à jour et les plus spécifiques en matière de périmètre géographique et technologique. La priorisation suivante est effectuée :

- La représentativité technologique est privilégiée par rapport à la représentativité géographique et temporelle ;
- La représentativité géographique est privilégiée par rapport à la représentativité temporelle.

Le logigramme suivant représente la ligne directrice suivie pour la recherche de données pour l'analyse du cycle de vie réalisé pour le BNR :

Figure 2-3 : Logigramme représentant la ligne directrice suivie pour la recherche des données du BNR 2019



Cette approche a introduit certaines limites liées à la cohérence méthodologique entre les inventaires issus de fédération (représentatives de l'industrie) et les inventaires Ecoinvent (base de données par défaut).

Pour cette étude, une attention particulière a dès lors été portée aux inventaires exerçant une influence significative sur les résultats. Tout inventaire issu d'une fédération a vu son utilisation remise en question en fonction de sa cohérence méthodologique avec Ecoinvent et du niveau de qualité de l'éventuel ICV Ecoinvent disponible. Cette analyse a mené à certaines adaptations des inventaires « problématiques » en termes de cohérence des résultats :

- **Aluminium** : les inventaires disponibles dans la base de données Ecoinvent (basés sur les données International Aluminium Institute (IAI) et European Aluminium Association (EAA)) sont préférés aux inventaires publiés par EAA. En effet, les données sont proches mais les inventaires IAI utilisent la base de données Ecoinvent dont le périmètre géographique est adaptable (cf. chapitre 3.2.4.2).
- **Cuivre** : l'inventaire de matière première vierge est adapté afin de ne pas considérer que 100% des particules émises par la production de cuivre sont émises en zone urbaine (cf. chapitre 3.2.4.3)
- **Verre d'emballage** : la modélisation des économies d'énergie, de matières premières évitée et de la décarbonatation permise grâce à l'incorporation de calcin dans les fours verriers de l'étude FEDEREC de 2017 a été retenue (cf. chapitre 3.3)
- **Plastique** : la modélisation du recyclage de plastiques produite par RDC, modifiable selon le type de résine et la zone géographique considérés, a été retenue à le défaveur des ICVs du Syndicat des Régénérateurs de matières Plastiques (SRP) agrégés et non modifiables.

Cohérence méthodologique et fiabilité des données :

La fiabilité de l'étude est examinée sous trois aspects différents :

- En ce qui concerne les données primaires, les contrôles de plausibilité de chaque donnée seront effectués par recoupements et par comparaison ;
- En ce qui concerne la cohérence du modèle ACV, des contrôles croisés concernant les flux de masse et d'énergie sont effectués ;
- En ce qui concerne la cohérence méthodologique, plusieurs sources de données sont utilisées pour les inventaires de cycle de vie. Par conséquent, la cohérence méthodologique n'a pas été systématiquement vérifiée (pas d'accès aux données de modélisation des inventaires des industriels). Un tableau précisant les principaux éléments méthodologiques de chaque inventaire de cycle de vie évalué dans le chapitre sur la qualité des données est proposé en *Annexe 3*.

Une analyse de la qualité des données et des incertitudes associées est présentée au chapitre 4 *Évaluation de la qualité des données*.

2.12 Critères de coupure

Le principe de Pareto est appliqué pour cette étude. Les efforts de modélisation et de collecte de données sont donc portés sur les éléments influençant le plus les résultats.

En pratique, nous avons procédé de manière itérative pour la collecte de données comme il est recommandé dans l'ILCD Handbook et l'ISO 14040/44 : 2006.

- Première itération : nous utilisons des valeurs par défaut (intervalles de valeurs) fournies par les acteurs ayant une vision globale de la problématique et les bases de données secondaires ou avec des hypothèses conservatrices pour identifier, de façon automatique et exhaustive, les paramètres de modélisation importants ;
- Deuxième itération : les données qui ont un impact non négligeable sont affinées via des contacts avec les acteurs de terrain ou/et des recherches complémentaires dans la littérature. Dans la mesure du possible, les lacunes pré-identifiées dans le cadre de la première étude sont également levées ;
- Troisième itération : ultime validation et recherche de données.

Cette approche permet de ne pas perdre de temps dans la recherche de données sans influence sur le bilan, et donc de mettre l'accent sur la recherche de données sensibles. Ainsi, un plus haut degré de fiabilité peut être atteint pour ces données sensibles.

Ce principe a été appliqué à chaque filière de recyclage modélisé : ferrailles, cuivre, aluminium, plomb, plastiques, papier-carton, inertes du BTP et bois (la filière de recyclage des ferrailles étant la principale contributrice, appliquer ce principe à l'échelle des volumes recyclés aurait conduit à apporter peu d'importance aux autres filières de recyclage).

Ce principe conduit à faire des approximations au sein d'une même filière pour les flux qui sont moins représentés en tonnage comme c'est le cas de l'acier au sein des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Les résultats de l'étude présentent donc un niveau de fiabilité plus grand pour l'ensemble des flux (résultats totaux du recyclage en France) et moins grand pour une filière en particulier (filière DEEE, Filière VHU en particulier).

La décision de modéliser ou non un procédé ou un flux repose donc sur le respect des règles suivantes :

- **Masse** : lors de l'utilisation de la masse comme critère, une décision appropriée nécessiterait l'inclusion dans l'étude de tous les intrants qui, cumulativement, participent à plus qu'un pourcentage défini de la masse du système étudié.
- **Énergie** : de même, lors de l'utilisation de l'énergie comme critère, une décision appropriée nécessiterait l'inclusion dans l'étude des intrants qui, cumulativement, participent davantage qu'un pourcentage défini des intrants énergétiques du système de produits.
- **Portée environnementale** : il convient que les flux pouvant être exclus en raison de leur masse ou de leur utilisation d'énergie ne le soient pas si les impacts associés à ces matériaux sont significatifs pour les indicateurs d'impacts évalués¹².

Via ce travail itératif et l'objectif initialement fixé d'atteindre 100% des impacts modélisés, on estime, à dire d'expert, que le seuil de coupure est de moins de 5% pour les trois critères : masse, énergie et impact environnemental.

¹² Par exemple, l'or présent dans une carte électronique est en très faible quantité pourtant la contribution de cet élément peut être supérieure au seuil de coupure sur les indicateurs d'impacts étudiés.

3 Calcul de l'inventaire : données et hypothèses

3.1 Principales sources de données

Les principales sources de données sont présentées dans le Tableau puis détaillées par filières de recyclage dans le reste du rapport.

Tableau 3-1 : Principales sources de données

Filière	Matériau d'origine (déchet à recycler)	Type de recyclage modélisé	Sources des inventaires des étapes de :				
			Collecte	Tri	Production des MPR	Incorporation des MPR	Production du vierge
Métaux ferreux	Acier	Acier d'origine recyclé	Inventaires développés dans le cadre de cette étude (cf. chapitre 3.2)			Worldsteel 2019	Worldsteel 2019
Métaux non ferreux	Aluminium	Aluminium d'origine recyclé	Inventaires développés dans le cadre de cette étude (cf. chapitre 3.2)			Ecoinvent 3.7.1 (basé sur IAI et EAA)	Ecoinvent 3.7.1 (basé sur IAI)
	Cuivre	Cuivre d'origine recyclé	Inventaires développés dans le cadre de cette étude (cf. chapitre 3.2)			Ecoinvent 3.7.1	Copper Alliance 2019 adapté
	Zinc	Zinc d'origine recyclé	Inventaires développés dans le cadre de cette étude (cf. chapitre 3.2)			Ecoinvent 3.7.1 adapté	Ecoinvent 3.7.1
	Plomb	Plomb d'origine recyclé	Inventaires développés dans le cadre de cette étude (cf. chapitre 3.2)			ILA (International Lead Association) 2017	ILA (International Lead Association) 2017
Verre	Verre creux	Verre fondu d'origine recyclé	Inventaires développés dans le cadre de cette étude (cf. chapitre 3.3)				
	Verre plat	Verre fondu d'origine recyclé	Inventaires développés dans le cadre de cette étude (cf. chapitre 3.3)				
Papier / Carton (PCR)	PCR issus des déchets ménagers, des industries, et papiers de bureau	Carton d'origine recyclé (wellensstoff)	Inventaires développés dans le cadre de cette étude (cf. chapitre 3.4)			Ecoinvent 3.7.1 (basé sur FEFCO 2015)	Ecoinvent 3.7.1 (basé sur FEFCO 2015)
		Carton d'origine recyclé				Ecoinvent 3.7.1 (basé sur FEFCO 2015)	Ecoinvent 3.7.1 (basé sur FEFCO 2015)
		Papier kraft d'origine recyclé				Ecoinvent 3.7.1 (basé sur FEFCO 2015)	Ecoinvent 3.7.1 (basé sur FEFCO 2015)

		Papier graphique d'origine recyclé		Ecoinvent 3.7.1	FEFCO 2015 via Ecoinvent 3.7.1
Plastiques	PET	Granules et paillettes de PET d'origine recyclé	Inventaires développés dans le cadre de cette étude (cf. chapitre 3.6)	Modélisation RDC (cf. chapitre 3.5)	Ecoinvent 3.7.1 (PlasticsEurope 2017)
	PEbd	Granules d'origine recyclé de PEbd (films agricoles et déchets industriels)			Ecoinvent 3.7.1 (PlasticsEurope 2014)
	PEhd	Granules et paillettes de PEhd d'origine recyclé			Ecoinvent 3.7.1 (PlasticsEurope 2014)
	PVC	Granules de PVC d'origine recyclé			Ecoinvent 3.7.1 (PlasticsEurope 2017)
	PP	Granules de PP d'origine recyclé			Ecoinvent 3.7.1 (PlasticsEurope 2014)
	PS	Granule de PS d'origine recyclé			Ecoinvent 3.7.1 (PlasticsEurope 2020)
Les inertes du BTP	Béton, briques, tuiles, céramiques, ardoises, enrobés et produits à base de bitume ne contenant pas de goudron, terres et cailloux non pollués, autres matériaux de démolition de chaussée, ballast de voie non pollué,	Production de granulats à partir de déchets inertes du BTP	Inventaires développés dans le cadre de cette étude (cf. chapitre 3.6)		Ecoinvent 3.7.1

	autres types de déchets inertes			
Bois	Déchets issus de la REP DEA et autres origines (hors palettes reconditionnées) ¹³	Recyclage en panneaux de particules	Inventaires développés dans le cadre de cette étude (cf. chapitre 3.7)	Inventaires développés dans le cadre de cette étude (cf. chapitre 3.7)

Le système de modélisation d'Ecoinvent est le « Cut-Off System Model ». La philosophie sous-jacente de ce système de modélisation est qu'un producteur est entièrement responsable de l'élimination de ses déchets et qu'il ne reçoit aucun crédit pour la fourniture de matières recyclables. L'utilisation de cette version de la base de données permet de faire soit même les choix de modélisation des conséquences du recyclage. Un écart par rapport aux choix de modélisation réalisés dans cette étude peut tout de même apparaître pour les inventaires d'arrière-plan : cet écart ne devrait exercer qu'une influence très limitée (quasi-nulle) sur les résultats.

¹³ REP : Responsabilité élargie du producteur. DEA : Déchets d'activités économiques

3.2 Inventaire de cycle de vie de la chaîne de recyclage de la filière métaux (ferreux et non-ferreux)

3.2.1 Origines et tonnages des flux collectés

 Tableau 3-2 : Origines et tonnages des flux collectés – métaux¹⁴

Flux par origine	Pourcentage*	Tonnage
Métaux non-ferreux – Acier		
Ferrailles issues de VHU	17 %	2 193 kt
Ferrailles issues de DEEE	3.5 %	446 kt
Emballages ménagers (en collecte sélective)	2 %	255 kt
Déchets de fabrication	19 %	2 451 kt
Bennes DND en mélange	5 %	645 kt
DMA via déchèteries et récupérateurs	5 %	645 kt
DAE via récupérateurs	50 %	6 265 kt
Total	100 %	12 900 kt
Métaux non-ferreux – Aluminium		
Aluminium issu de VHU	7 %	37 kt
Aluminium issu de DEEE	3 %	16 kt
Emballages ménagers (en collecte sélective)	15 %	81 kt
Déchets de fabrication	28 %	154 kt
DMA via déchèteries et récupérateurs	9 %	48 kt
DAE via récupérateurs – hors câbles	35 %	195 kt
DAE via récupérateurs – câbles	4 %	20 kt
Total	100 %	551 kt
Métaux non-ferreux – Cuivre		
Aluminium issu de VHU	5 %	11 kt
Aluminium issu de DEEE	2 %	5 kt
Déchets de fabrication	19 %	47 kt
DMA via déchèteries et récupérateurs	6 %	15 kt
DAE via récupérateurs – hors câbles	35 %	85 kt
DAE via récupérateurs – câbles	33 %	82 kt
Total	100 %	245 kt
Métaux non-ferreux – Zinc		
Zinc issu des DMA et DAE	100 %	143 kt
Total	100 %	143 kt
Métaux non-ferreux – Plomb		
Plomb (toutes origines)	100 %	347 kt
Total	100 %	347 kt

Source : FEDEREC 2021

*En raison des arrondis, la somme des chiffres significatifs visibles peut conduire à une valeur supérieure ou inférieure à 100 % (99.5% ou 101% par exemple). Se référer aux tonnages pour les proportions exactes.

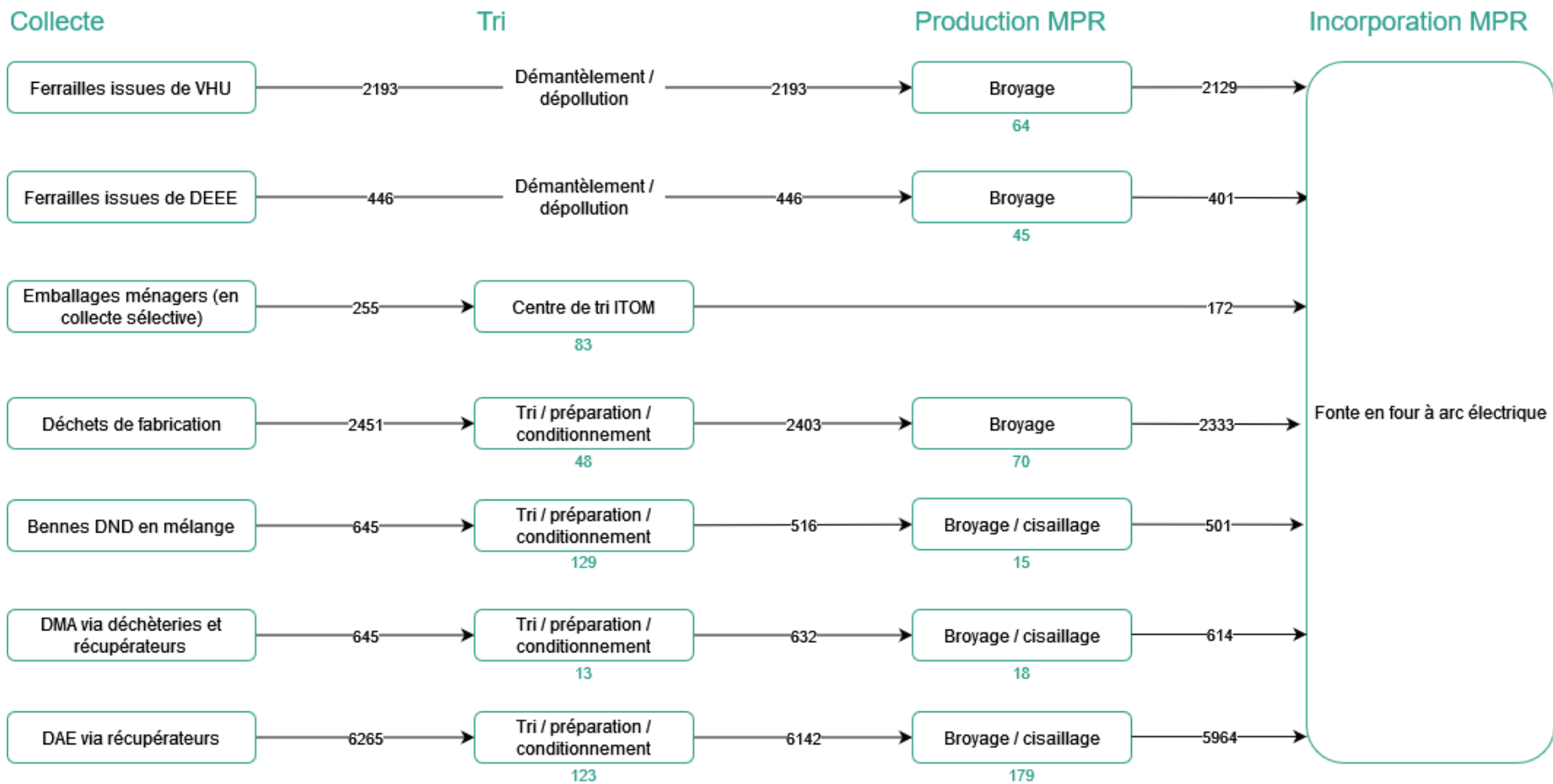
¹⁴ VHU ; véhicule hors d'usage. DND ; déchets non dangereux. DMA déchets ménagers et assimilés

3.2.2 Étapes du cycle de vie incluses dans le système

Les étapes de cycle de vie considérées pour le recyclage des métaux sont présentées dans les figures ci-dessous. Les hypothèses et sources utilisées pour déterminer les tonnages de MPR incorporés à partir des tonnages collectés en amont sont présentés dans les sous-chapitres 3.2.3 et 3.2.4. La proportion d'emballages ménagers (acier et aluminium) a été déduite de l'enquête sur les Installations de Traitement des Ordures Ménagères (ITOM) 2018¹⁵.

¹⁵ ADEME 2018 – Exploitation des données de l'enquête sur les installations de traitement des déchets ménagers et assimilés en France en 2018

Figure 3-1 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage de l'acier



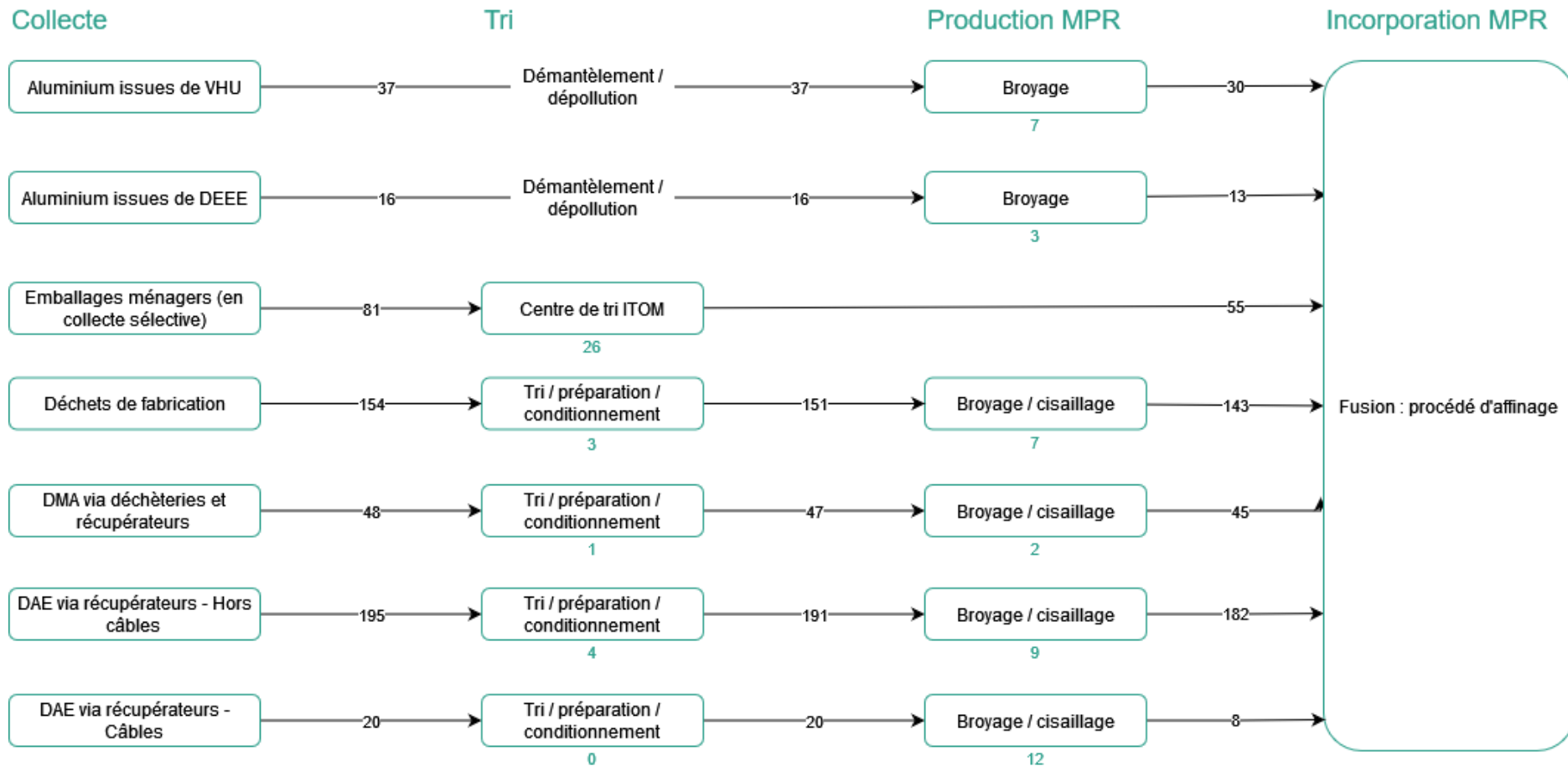
Tonnages collectés - FEDEREC 2021 :

Total collecté : 12 900 kt
Total recyclé : 11 695 kt

Légende :

- xx : Tonnages entrants et sortants de chaque étape
- xx : Pertes et indésirables imputés au flux à recycler

Figure 3-2 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage de l'aluminium



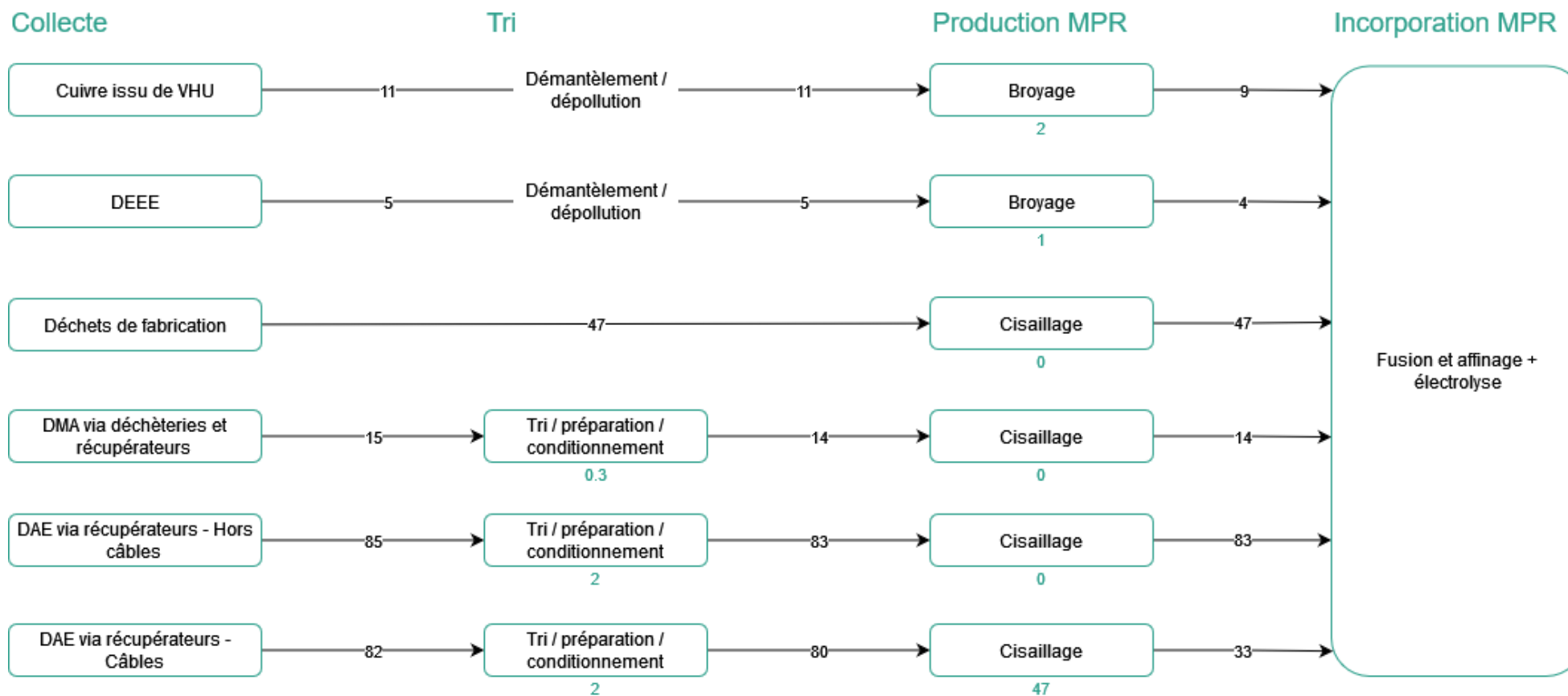
Tonnages collectés - FEDEREC 2021 :

- Total collecté : 551 kt
- Total recyclé : 475 kt

Légende :

- xx : Tonnages entrants et sortants de chaque étape
- xx : Pertes et indésirables imputés au flux à recycler

Figure 3-3 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage du cuivre



Tonnages collectés - FEDEREC 2021 :

Total collecté : 245 kt
Total recyclé : 191 kt

Légende :

- xx : Tonnages entrants et sortants de chaque étape
- xx : Pertes et indésirables imputés au flux à recycler

Dans le cas du cuivre et de l'aluminium, les flux recensés par FEDEREC sont subdivisés en 2 sous-catégories : câbles et hors-câbles. Par simplification, il a été considéré que l'ensemble des tonnages câbles (33% et 4% des tonnages collectés pour le cuivre et l'aluminium respectivement) suivent les mêmes étapes de cycle de vie que les DAE via récupérateurs. Les pertes et indésirables sont cependant spécifiques à ce type de flux car les gaines en matière plastique sont incluses dans les tonnages collectés (Tableau 3-5).

Figure 3-4 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage du zinc

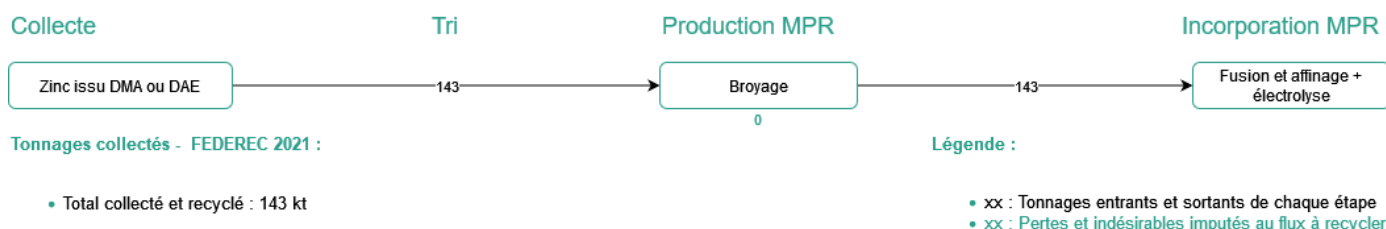
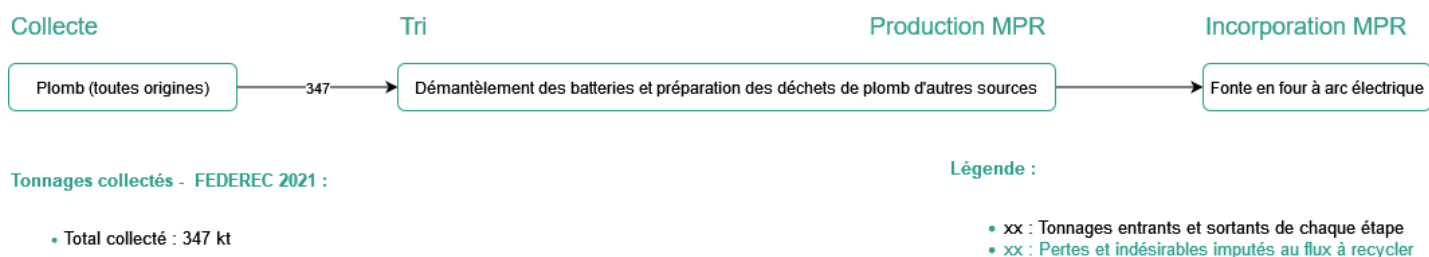


Figure 3-5 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage du plomb



3.2.3 Données utilisées pour les étapes de collecte, tri et production des MPR

3.2.3.1 Collecte

La collecte des métaux est modélisée au moyen des données et hypothèses suivantes (lorsque applicable cf. schéma au chapitre 3.2.2) :

Tableau 3-3 : Inventaire de la collecte - métaux

	Donnée	Source	Inventaire de cycle de vie
VHU			
Distance en voiture jusqu'au point de dépose	10 km en voiture Apport moyen par visite : 1 100.4 kg	[1] [4]	Market for transport, passenger car, RER, EI v3.7.1
Distance en camion du point de dépose vers le centre de démantèlement / dépollution	150 km en camion 14 t charge utile	[1]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Error! Reference source not found.)

Emballages ménagers (collecte en porte à porte)			
Collecte sélective en porte à porte hors verre	54 km/t en camion benne à ordures*	[3]	Modélisation d'une benne à ordures ménagères détaillée en Annexe 1 <i>Error! Reference source not found.</i>
Tous les flux de DMA hors emballages ménagers et VHU			
Distance en voiture et apport moyen hors gravats	10 km en voiture aller-retour Apport moyen par visite : 72 kg	[1] [2]	Market for transport, passenger car, RER, EI v3.7.1
Distance en camion du point d'apport volontaire vers le centre de tri	150 km en camion 14 t charge utile	[1]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Annexe 1)
Flux de DAE lorsqu'il y a l'étape de tri / préparation / conditionnement			
Distance en camion du producteur du déchet vers le centre de tri / recyclage	150 km en camion 14 t charge utile	[1]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Annexe 1)
DAE et mâchefers lorsque le flux est directement envoyé en étape de production de MPR ou consommation de MPR			
Distance en camion du producteur du déchet vers l'étape de production de MPR / consommation MPR	500 km en camion 14 t charge utile	[1]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Annexe 1)

[1] : Hypothèse

[2] : Chiffres clés des déchèteries, SINOE, données France 2015. L'apport moyen en gravats est déduit de l'apport moyen hors gravats (72 kg/visite) et l'apport moyen y compris gravats (98 kg/visite) et du tonnage collecté annuellement associé à ces chiffres (respectivement 9 898 602 et 13 497 826 tonnes).

[3] : ADEME - Enquête collecte 2007 - Analyse des distances parcourues par les bennes de collecte des ordures ménagères, octobre 2009.

[4] : Rapport annuel de l'Observatoire de la filière des véhicules hors d'usage - Données 2018 (Poids moyen d'un VHU)

* Les nouveaux modes de motorisation ne sont pas modélisés (BOM au gaz naturel ou électrique par exemple)

Remarque : la collecte des emballages ménagers est approchée par la collecte en porte à porte même s'il existe une part de collecte en point d'apport volontaire.

3.2.3.2 Tri

Le tri des métaux est modélisé au moyen des données et hypothèses suivantes (lorsque applicable cf. schéma en 3.2.2) :

Tableau 3-4 : Inventaire des étapes de tri - métaux

	Donnée	Source	Inventaire de cycle de vie
Emballages ménagers (collecte en porte à porte)			
Consommation électrique	50 kWh / tonne entrante	[1]	Market for electricity, medium voltage, FR, EI v3.7.1

Taux de refus des déchets ménagers (recyclables secs des ordures ménagères)	32,5% des tonnages entrants	[2]	-
Centre de tri/préparation/conditionnement des métaux (ou récupérateurs)			
Consommations énergétiques du site de tri / préparation	44 MJ de diesel / tonne entrante (<i>déplacement des engins sur les sites de tri/préparation des métaux</i>)	[3]	Diesel, burned in building machine, GLO, EI v3.7.1
Taux de refus (bennes DND en mélange)	20% des tonnages entrants	[4]	-
Taux de refus	2% des tonnages entrants	[3]	-

[1]: « Environmental and Economic analysis of end-life of packaging in MSW », Ecoemballages, Eco-Embes, Sociedad Ponto Verde and FOST Plus, March 2009

[2]: ADEME 2020 - Le traitement des Déchets Ménagers et Assimilés en 2018 (part des tonnages entrant en centre de tri envoyés en UIOM et stockage ISDND)

[3]: FEDEREC - Évaluation environnementale du recyclage en France selon la méthodologie de l'analyse du cycle de vie, mars 2017

[4]: Hypothèse validée par des experts métiers

3.2.3.3 Production des MPR

La production de MPR issue de déchets métalliques est modélisée au moyen des données et hypothèses suivantes (lorsque applicable cf. schéma en 3.2.20) :

Tableau 3-5 : Inventaire des étapes de broyage, cisailage et de transports amont et aval - métaux

	Donnée	Source	Inventaire de cycle de vie
Transport jusqu'au site de production des MPR	400 km par camion charge utile 24 t	[3]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Error! Reference source not found.)
Production de MPR			
Type de broyeur	Broyeur sec	[4]	-
Consommation électrique broyage hors VHU et DEEE	30 kWh / tonne entrante (entre 7 et 60 kWh / tonne)	[2]	Market for electricity, medium voltage, FR, EI v3.7.1
Consommation électrique broyage pour VHU et DEEE	60 kWh / tonne entrante (entre 7 et 60 kWh / tonne). Valeur haute appliquée en raison de la complexité du flux (multi matériau) générant des étapes de tri et tri post-broyage supplémentaires par rapport au broyage de déchets mono-matériau	[2]	Market for electricity, medium voltage, FR, EI v3.7.1
Broyage DEEE	-	-	Treatment of waste electric and electronic equipment,

			shredding, GLO EI v3.7.1 (consommation électrique supprimée de l'inventaire étant donné qu'elle est déjà comptabilisée cf. ci-dessus)
Epuration des émissions	1/2 : Cyclone + lavage humide 1/2 : Cyclone + filtre à manche	[5] et [3]	-
Durée journalière typique de fonctionnement d'un broyeur	entre 8 et 12 h	[1]	-
Émissions dans l'air (poussière et métaux lourds)	Tableau 12-3	[3] (Annexe 6)	-
Répartition des poussières entre PM > 10, PM 2.5-10 et PM 2.5 ¹⁶	57% (PM > 10), 9,5 % (PM 2.5 - 10) et 33 % (PM 2.5)	[7] (Annexe 6)	-
Pertes et indésirables dans les flux entrant au broyeur (hors DEEE et VHU)	3%	[4]	-
Pertes et indésirables dans les flux entrant au broyeur DEEE et VHU	20%	[8]	-
Pertes et indésirables dans les flux entrant au broyeur câbles	59%	[8]	-
Transport jusqu'au site de consommation de MPR	Destination France : 500 km par camion charge utile 24 t Destination Europe : 1500 km par camion charge utile 24 t	[1]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Annexe 1)

[1] : Hypothèse validée par des experts métiers

[2] : Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Treatment, JRC, 2018

[3] : Hypothèse basée sur le document BAT, tableau des technologies de traitement des poussières (chapitre 3.1.2.1.2). Un plus grand nombre de broyeurs possédant ces technologies ont alimenté le tableau de données

[4] : Hypothèse validée par des experts métiers dans : FEDEREC - Évaluation environnementale du recyclage en France selon la méthodologie de l'analyse du cycle de vie, mars 2017

[5] : ADEME - Automobiles – Données 2019 – Rapport annuel (chapitre 3.3.2.2.2)

[6] : ADEME - Registre DEEE - Rapport Annuel - Données 2019 (chapitre 10.3.2)

[7] : DEPARTMENT OF TOXIC SUBSTANCES CONTROL (California) - Evaluation and Analysis of Metal Shredding Facilities and Metal Shredder Wastes - August 2021

[8] : Donnée FEDEREC 2021

¹⁶ PM : particulate matter

Selon le BREF traitement des déchets 2018¹⁷ : « Les émissions dans l'air d'une installation de broyage sont susceptibles d'être constituées de poussières, y compris des particules de métaux (lourds), de COV, de vapeur d'eau ou, occasionnellement, de fumée, de poussière et potentiellement de dioxines, dans des conditions de fonctionnement différentes des conditions normales (par exemple, déflagration) ou lorsque des déchets non ou mal épurés sont broyés ». Les données du document ne permettent pas de déterminer directement la quantité de polluant par tonne de déchet broyés. Dans l'objectif d'éviter que les résultats de cette étude sous-estiment les impacts du broyage sur les indicateurs de santé humaine (toxicité et émissions de particules), des hypothèses ont été posées concernant la durée journalière typique de fonctionnement d'un broyeur et la répartition des poussières selon leur taille (cf. Annexe 6), les données obtenues sont reprises en Tableau 3-6.

Tableau 3-6 : Émissions calculées pour une tonne de métal broyée

	Cyclone et laveur humide	Cyclone et filtre à manches
Poussières totales (mg/t)	3 690	339
Ni (mg/t)	1 082	106
Pb (mg/t)	10	0.80
Cd (mg/t)	0.5	0
Cu (mg/t)	18	16

Toujours selon le BREF traitement des déchets, les sites de broyage sont équipés de surfaces imperméables pour récupérer les eaux de pluies. Les eaux de pluies et de process sont envoyées en station d'épuration lorsqu'elles ne sont pas réutilisées. Les données du document ne permettent pas de déterminer la quantité d'eau par tonne de déchets broyés. Ainsi, il est probable que les résultats de l'étude sous-estiment les impacts du broyage sur les indicateurs : d'eutrophisation, d'écotoxicité et de toxicité humaine. En effet, ces indicateurs sont sensibles aux polluants retrouvés dans les eaux usées cependant, à dire d'expert ACV¹⁸, on peut s'attendre à ce que ces données influenceraient faiblement les résultats.

3.2.4 Données utilisées pour les étapes d'incorporation des MPR et de production vierge

3.2.4.1 Métaux ferreux

Les impacts de la transformation de la ferraille dans les fours électriques sont modélisés par l'inventaire de cycle de vie publié par Worldsteel

: « *Steel scrap benefits, RER, worldsteel 2019 (données 2017)* ».

Dans le cas de cet inventaire, c'est la différence entre la production d'acier recyclé et la production d'acier vierge qui est modélisée. Les résultats sont donc directement affichés en « impacts évités »,

¹⁷ Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Treatment, JRC, 2018

¹⁸ En revanche deux points doivent être discutés : (i) tel que présenté en Annexe 2, parmi ces indicateurs susceptibles d'être influencés par cette consommation d'eau seuls les indicateurs d'eutrophisation (eau douce et marine) ont été sélectionnés comme pertinents dans cette évaluation environnementale et (ii) les résultats de l'étude pour les autres indicateurs (sensibles aux consommations d'énergies) montrent que l'étape de broyage présente une influence limitée sur les résultats de l'évaluation environnementale d'une filière, à l'inverse des étapes d'incorporation des MPR et de production vierge évitée (cf. chapitre sur les résultats). Il est dès lors raisonnable de considérer que la prise en compte des émissions dans les eaux usées à l'étape de broyage n'impliquerait pas un changement significatif dans les résultats.

notamment sur base des économies d'énergies associées à l'utilisation de ferrailles plutôt que d'acier à produire à partir de minerais de fer et de charbon.

La couverture géographique des entreprises ayant participé à l'élaboration de cet ICV permet d'écarter les inventaires Ecoinvent bien que le mix énergétique y soit adaptable. En effet ces ICV sont principalement basés sur la littérature, là où l'inventaire Worldsteel s'appuie sur une collecte de donnée couvrant 38% de la production européenne d'acier.

Tableau 3-7 : Inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR et de production vierge – Acier

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Steel scrap (external supply) – Value of Scrap
Technologie modélisée	100% vierge : procédé Linz-Donawitz (Basic Oxygen Furnace)
	100% recyclé : fours à arc électrique (Electric Arc Furnace)
Représentativité géographique	Technologies employées dans le monde
Représentativité temporelle	Inventaire basé sur des données représentatives de la période 2012 à 2015
	Couvre 25% de la production mondiale, 38% de l'europpéenne
Source et année de publication	Worldsteel, 2019
Mix électrique	Mondial (non adaptable)
Quantité de scrap d'acier entrant (t / tonne produite)	1,092

3.2.4.2 Aluminium

L'enjeu environnemental principal lié à la production d'aluminium est, en règle générale, la consommation d'électricité liée à l'étape d'électrolyse de l'alumine. Pour cette raison, il est crucial de pouvoir adapter le mix électrique de l'inventaire considéré si celui-ci n'est pas français par défaut.

Les inventaires désagrégés et modifiables issus de Ecoinvent ont donc été préférés aux ICV publiés par l'EAA mobilisés lors de la précédente étude. Une analyse comparative de ces deux sources d'ICV a par ailleurs été menée et les résultats ne présente pas de différences significatives.

Tableau 3-8 : Inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR – Aluminium (refiner/fusion-affinage)

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Treatment of aluminium scrap, at refiner, RER
Technologie modélisée	36% four à réverbère et 64% four rotatif
Représentativité géographique	Représentatif de 90% des technologies employées en Europe
Représentativité temporelle	Inventaire basé sur des données EAA 2005 et des données plus anciennes d'Ecoinvent (elles-mêmes basées sur des données EAA plus anciennes)
Source et année de publication	Ecoinvent v3.7.1 (2022)
Mix électrique	Europe
Quantité de scrap d'aluminium entrant (t / tonne produite)	1,04

Remarque : deux inventaires sont disponibles dans le cas de l'aluminium, le premier est généralement utilisé sur des flux purs, des déchets de fabrication typiquement (remelter/recyclage direct). Le second présenté ci-dessus est applicable aux déchets de fabrication et aux déchets post-consommateur (refiner/fusion affinage).

Le bilan environnemental du recyclage de l'aluminium via l'inventaire « Remelter/recyclage direct » est évalué en analyse de sensibilité.

Tableau 3-9 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – Aluminium

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Aluminium production, primary, ingot – IAI Area, EU27 & EFTA
Technologie modélisée	Production d'aluminium par électrolyse (procédé Hall Héroult)
Représentativité géographique	Bauxite et exploitation minière : données IAI à 100 % (pas de données européennes sur l'aluminium) Production d'alumine : 61% d'aluminium européen et 39% de données IAI Electrolyse incluant la production d'anodes et la fonderie : 100% Aluminium européen et 0% données IAI
Représentativité temporelle	Données représentatives 2015
Source et année de publication	IAI via Ecoinvent v3.7.1 (2022)
Mix électrique adaptable ?	Oui

3.2.4.3 Cuivre

L'inventaire d'électrolyse du cuivre de Ecoinvent est un inventaire présentant une faible qualité : les données sont anciennes et essentiellement basées sur la littérature. Les résultats associés à cet inventaire présentent donc de fortes incertitudes.

Le compartiment d'émission du dioxyde de soufre et des poussières a été modifié étant donné que, dans sa version par défaut, l'inventaire indique que ces polluants sont émis dans un air urbain, proche du sol. Nous considérons qu'il est préférable de considérer le compartiment suivant : air non-urbain ou issu de hautes cheminées.

Tableau 3-10 : Inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR – Cuivre

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Treatment of copper scrap by electrolytic refining, RER
Technologie modélisée	Affinage électrolytique
Représentativité géographique	Technologies employées en Europe
Représentativité temporelle	Inventaire de cycle de vie représentatif de l'année 2003
Source et année de publication	Ecoinvent v3.7.1 (2022)
Mix électrique	Europe
Quantité de scrap de cuivre entrant (t / tonne produite)	1,31

L'inventaire de production vierge du cuivre dont la représentativité géographique couvre 21% du volume annuel mondial provient de Copper Alliance. Ceci n'est pas une modification par rapport à l'évaluation de 2017.

L'inventaire produit par Copper Alliance contient 20% de matière recyclé et celui-ci est adapté afin d'approximer la production théorique de cuivre 100% vierge.

Tableau 3-11 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – Cuivre

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Copper cathode, 99,99%
Technologie modélisée	Production de cathodes de cuivre contenant environ 20% de matière secondaire et 80% de vierge
Représentativité géographique	Les données primaires spécifiques pour l'étude ont été fournies par les sociétés membres de l'International Copper Association et modélisées en utilisant les bases de données GaBi 2014. L'ICV comprend la production sur quatre continents et représente 21 % du volume annuel de production mondiale de cathodes de cuivre pour l'année de référence 2013.
Représentativité temporelle	Données représentatives de 2013
Source et année de publication	Copper Alliance 2019
Mix électrique	Mondial (non modifiable)

3.2.4.4 Zinc

À ce jour ni Ecoinvent, ni une fédération d'entreprises n'a publié d'inventaire de cycle de vie pour l'incorporation de MPR issues de déchets en Zinc.

Le recyclage de ce métal a donc été approximé sur base de l'inventaire de production vierge présenté en Tableau 3-13, avec les modifications suivantes :

- Suppression de l'inventaire de la production de concentré de zinc à partir de minerai,
- Hypothèse de la pureté des déchets de zinc broyés et adaptation des consommations d'énergie (présentées dans le *Tableau 3-12*).

À noter également qu'un coefficient est appliqué à l'inventaire de production de vierge. En effet, celui-ci correspond à la transformation de zinc concentré à 75% pour obtenir une pureté de 99.995% (il faut 1.3263 kg de concentré de zinc pour produire 1 kg de zinc vierge). Considérant que la pureté des déchets de zinc est de 95% (hypothèse), le coefficient suivant a été appliqué à l'inventaire de production de vierge : $1/1.3263 \times 1.05 = 0.79$.

Tableau 3-12 : Hypothèses et données pour l'inventaire de l'étape d'incorporation des MPR - Zinc

Paramètre	Donnée	Source
Hypothèses / données de modélisation		
Pureté des déchets de zinc	95%	[1]
Consommation d'énergie évitées		
Gaz naturel	0.062 MJ/kg zinc vierge	[2]
Électricité	0.034 kWh/kg zinc vierge	[2]

[1] Hypothèse

[2] Retrait des procédés de roasting et sintering, allouables au minerai et non nécessaires dans le cas du recyclage : Primary zinc production from concentrate, Elv3.7.1 RoW

Tableau 3-13 : Inventaire pour l'étape de production vierge évitée - Zinc

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Primary zinc production from concentrate, RoW
Technologie modélisée	Production de zinc vierge à haut grade (SHG) par un mélange représentatif de procédés pyro- et hydrométallurgiques.
Représentativité géographique	Mix de 80% de production hydrométallurgique (procédé majoritaire en Europe) et 20% pyrométallurgique
Représentativité temporelle	Toutes les données primaires recueillies pour cette étude sont considérées comme représentatives de l'année 2012. Les données primaires utilisées dans l'étude précédente de 2009 sont représentatives de la production des années 2005 et 2006, mais on peut supposer que la technologie n'a pas beaucoup changé depuis. De plus, la technologie n'a pas changé de manière significative entre 2012 et 2019. Ces données sont donc considérées comme appropriées pour modéliser la production actuelle de zinc.
Source et année de publication	Ecoinvent 3.7.1 (2022)
Mix électrique	Europe

3.2.4.5 Plomb

Les inventaires ILA (International Lead Association) ont été utilisés pour cette mise à jour et donc préférés aux inventaires Ecoinvent qui s'appuient sur des données plus anciennes (2005).

Tableau 3-14 : Inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR – Plomb

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Secondary route lead production
Technologie modélisée	Mix technologique - Production de plomb secondaire (recyclé) issu de batteries de plomb et déchets de plomb
Représentativité géographique	Données issues de sites représentatifs de 50 % de la production secondaire en Europe. Les données sur l'énergie et les combustibles ont été basées sur le pays de production concerné pour chaque site de production et des données spécifiques à chaque pays ont été utilisées chaque fois que possible.
Représentativité temporelle	Inventaire de cycle de vie représentatif de l'année 2015
Source et année de publication	ILA 2017
Mix électrique adaptable ?	Non
Quantité de déchets de plomb entrants (t / tonne produite)	1.11*

* **Remarque** : l'inventaire de cycle de vie de ILA étant confidentiel, une autre source a été utilisée pour déterminer l'efficacité du procédé de fusion + affinage¹⁹.

Tableau 3-15 : Inventaire pour l'étape de production vierge évitée – Plomb

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Primary route lead production
Technologie modélisée	Mix technologique pour la production du plomb vierge de 99 à 99.99% de pureté
Représentativité géographique	Etats-Unis et Europe
Représentativité temporelle	Données représentatives de 2015
Source et année de publication	ILA 2017
Mix électrique adaptable ?	Non

¹⁹ En effet, selon la source de donnée utilisée par Ecoinvent (Quirijnen L. (1999) *How to implement efficient local lead-acid battery recycling*. In: *Journal of Power Sources*, 78(1-2), pp. 267-269) dans l'inventaire de cycle de vie : *treatment of scrap lead acid battery, remelting, RER, Elv3.7.1*, la technologie la plus utilisée pour le recyclage des batteries au plomb (shaft furnace with post combustion) produit : 5 000 t / an d'acide sulfurique (concentration de 15 %) ; 25 000 t de lingots de plomb (98 % Pb) ; 1 200 t / an de scories (1 % Pb) et ; 3 000 t / an de plomb brut (10 % Pb) destinés aux usines de première fusion. Le rendement global de récupération du Pb est généralement de 98,8 % au niveau de l'usine et de 99,8 % après retraitement de la matre. Sur cette base, on considère que le procédé génère 1 200t + 2 700t (3 000 t – 300 t) soit 3 900 tonnes de déchets pour 34 200 tonnes sortant du process et 1,11 tonne de déchets entrants par tonne de plomb secondaire produite.

3.3 Inventaire de cycle de vie de la chaîne de recyclage de la filière verre

3.3.1 Origines et tonnages des flux collectés

Tableau 3-16 : Origines et tonnages des flux collectés – Verre

Flux par origine	Pourcentage*	Tonnage
Verre creux DMA		
Verre creux et emballages	90 %	2 278 kt
Verre industriel		
BTP	0,5 %	10 kt
Déchets de fabrication	6.5 %	161 kt
VHU	2 %	46 kt
Autres (dont DEEE)	1 %	24 kt
Total	100 %	2 518 kt

*En raison des arrondis, la somme des chiffres significatifs visibles peut conduire à une valeur supérieure ou inférieure à 100 % (99.5% ou 101% par exemple). Se référer aux tonnages pour les proportions exactes.

Le verre industriel collecté par FEDEREC (10% du tonnage de verre collecté annuellement) est issu de trois sources dans les proportions suivantes :

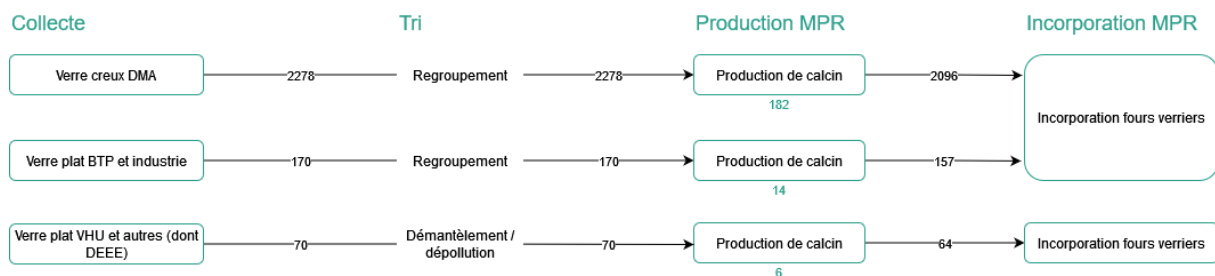
- Déchets de fabrication : 67%
- BTP : 4%
- VHU : 19%
- Autres (dont DEEE)* : 10 %

*FEDEREC indique que le flux « Autres » est majoritairement - mais pas exclusivement - composé de DEEE. Nous ne considérerons que les données et hypothèses propres aux DEEE en raison de l'absence d'une répartition plus précise du flux « Autres ».

Cette hypothèse ne concernera que les étapes de collecte.

3.3.2 Étapes du cycle de vie incluses dans le système

Figure 3-6 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage du verre



Tonnages collectés - FEDEREC 2021 :

- Total collecté : 2 518 kt
- Total recyclé : 2 317 kt

Légende :

- xx : Tonnages entrants et sortants de chaque étape
- xx : Pertes et indésirables imputés au flux à recycler

3.3.3 Données utilisées pour les étapes de collecte et de production de MPR

3.3.3.1 Collecte

La collecte du verre est modélisée au moyen des données et hypothèses suivantes (lorsque applicable cf. schéma en 3.3.2) :

Tableau 3-17 : Inventaire de la collecte – Verre

	Donnée	Source	Inventaire de cycle de vie
Collecte verre creux (DMA) en point d'apport volontaire			
Distance jusqu'au point de collecte	Pas d'impacts	[1]	-
Distance en camion du point d'apport vers le centre de regroupement	150 km en camion 14 t charge utile	[1]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Error! Reference source not found.)
Collecte verre creux (DMA) en porte à porte			
Collecte sélective en porte à porte du verre	12 km/t en camion benne à ordures	[3]	Modélisation d'une benne à ordures ménagères détaillée en Error! Reference source not found.
Verre plat du BTP et de l'industrie			
Distance en camion du producteur du déchet vers le centre de tri / recyclage	150 km en camion 14 t charge utile	[1]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Error! Reference source not found.)
Verre plat de VHU			
Distance en voiture jusqu'au point de dépose	10 km en voiture Apport moyen par visite : 1100.4 kg	[1] [4]	Market for transport, passenger car, RER, EI v3.5
Distance en camion du point de dépose vers le centre de démantèlement / dépollution	150 km en camion 14 t charge utile	[1]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Error! Reference source not found.)
Verre plat de DEEE			
Distance en voiture et apport moyen hors gravats	10 km en voiture aller-retour Apport moyen par visite : 72 kg	[1] [2]	Market for transport, passenger car, RER, EI v3.5
Distance en camion du point d'apport volontaire vers le centre de tri	150 km en camion 14 t charge utile	[1]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Error! Reference source not found.)

[1] : Hypothèse : trajet réalisé à pied ou à l'occasion de déplacement non dédiés à la dépose de déchets de verre

[2] : Chiffres clés des déchèteries, SINOE, données France 2015. L'apport moyen en gravats est déduit de l'apport moyen hors gravats (72 kg/visite) et l'apport moyen y compris gravats (98 kg/visite) et du tonnage collecté annuellement associé à ces chiffres (respectivement 9 898 602 et 13 497 826 tonnes).

[3] : ADEME - Enquête collecte 2007 - Analyse des distances parcourues par les bennes de collecte des ordures ménagères, octobre 2009.

[4] : Rapport annuel de l'Observatoire de la filière des véhicules hors d'usage - Données 2018 (Poids moyen d'un VHU)

Les déchets de verre creux sont collectés à 15% en porte à porte et 85% en apport volontaire (ADEME – SINOE 2015).

3.3.3.2 Production de MPR

La production de calcin est modélisée au moyen des données et hypothèses suivantes :

Tableau 3-18 : Inventaire de la production de calcin

	Donnée	Source	Inventaire de cycle de vie
Transport depuis le site de regroupement	250 km en camion 24 t charge utile	[1]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Error! Reference source not found.)
Production de calcin			
Consommation d'électricité	3.75 kWh / t de déchets de verre entrant	[2]	Market for electricity, medium voltage, FR, EI v3.7.1
Taux de pertes et indésirables	8 % dans le flux entrant	[2]	-

[1] : hypothèse

[2] : Hypothèse basée sur l'inventaire Ecoinvent : treatment of waste glass from unsorted public collection, sorting, RER

3.3.4 Données utilisées pour les étapes de d'incorporation des MPR et de production vierge

Dans le cas du verre, la modélisation est directement établie afin de déterminer les effets de l'incorporation de calcin dans les fours verriers.

L'ajout de calcin dans ces fours permet notamment :

- d'éviter une consommation de matières premières vierges listées en Tableau 3-20 et Tableau 3-21 (**variables selon le type de verre – plat ou creux**) ;
- d'éviter des émissions de CO₂ liées à la décarbonatation des matières premières vierges ;

Les émissions de CO₂ évitées liées à décarbonatation des matières premières vierges sont calculées selon la stœchiométrie de la réaction :

- Oxyde de sodium (Na₂CO₃) : $44 / (2 \cdot 23 + 16 + 44) = 0.415$ kg CO₂ émis par kg d'oxyde de sodium utilisée
- Oxyde de calcium (CaCO₃) : $44 / (40 + 16 + 44) = 0.444$ kg CO₂ émis par kg craie utilisée
- de réduire la consommation énergétique du four.

Cette approche a été préférée à l'utilisation des inventaires de la Fédération Européenne du Verre (FEVE) (utilisés lors de la précédente version de l'évaluation) en raison du caractère modifiable des mix énergétiques et des compositions des verres.

Tableau 3-19 : Effets de l'incorporation de calcin

Paramètre	Donnée	Source
Consommation de matières premières vierges évitées	1.2 tonne de MP vierges par tonne de calcin en entrée de four verrier	[1]
Consommation énergétique évitée	Réduction de 2.5 à 3% (retenu 2.75%) par tranche de 10% de calcin ajouté dans le four	[1]
Consommation moyenne d'un four verrier ne contenant pas de calcin	Entre 5.3 et 7.3 GJ/t de verre fondu	[1]

Types d'énergies consommées dans les fours verre creux	85 % gaz naturel, 15 % électricité	[2]
Types d'énergies consommées dans les fours verre plat	98% gaz naturel, 2% électricité	[2]

[1] : GLS-BREF, (2013), European Commission, Joint Research Centre, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU. ScaletBianca Maria, Garcia Munos Marcos, Sissa Aivi Querol, Roudier Serge, Delgado Sancho Luis

[2] EU-MERCI 2020, Technical analysis – Glass sector

Tableau 3-20 : Composition typique d'un verre d'emballage (sans calcin)

Paramètre	Donnée [1]
Silice, sable de quartz (SiO ₂)	61%
Carbonate de calcium (CaCO ₃)	15%
Carbonate de sodium (Na ₂ CO ₃)	18%
Oxyde de magnésium (MgO)	7%
Oxyde de sodium (Na ₂ O)	0%
Oxyde d'aluminium	0%
Oxyde de potassium (K ₂ O)	0%
Trioxyde de soufre (SO ₃)	0%

[1] Life Cycle Assessment of Container Glass in Europe, Method report, commissioned by European Container Glass Federation (FEVE), July 2010

Tableau 3-21 : Composition typique d'un verre plat (sans calcin) – sodo-calcique

Paramètre	Donnée [1]
Silice, sable de quartz (SiO ₂)	73%
Carbonate de calcium (CaCO ₃)	8.6%
Carbonate de sodium (Na ₂ CO ₃)	0%
Oxyde de magnésium (MgO)	4%
Oxyde de sodium (Na ₂ O)	14%
Oxyde d'aluminium	0.7%
Oxyde de potassium (K ₂ O)	0.3%
Trioxyde de soufre (SO ₃)	0.1%

[1] : GLS-BREF, (2013), European Commission, Joint Research Centre, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU. ScaletBianca Maria, Garcia Munos Marcos, Sissa Aivi Querol, Roudier Serge, Delgado Sancho Luis

3.4 Inventaires de cycle de vie de la chaîne de recyclage de la filière papier-carton

3.4.1 Origines et tonnages des flux collectés

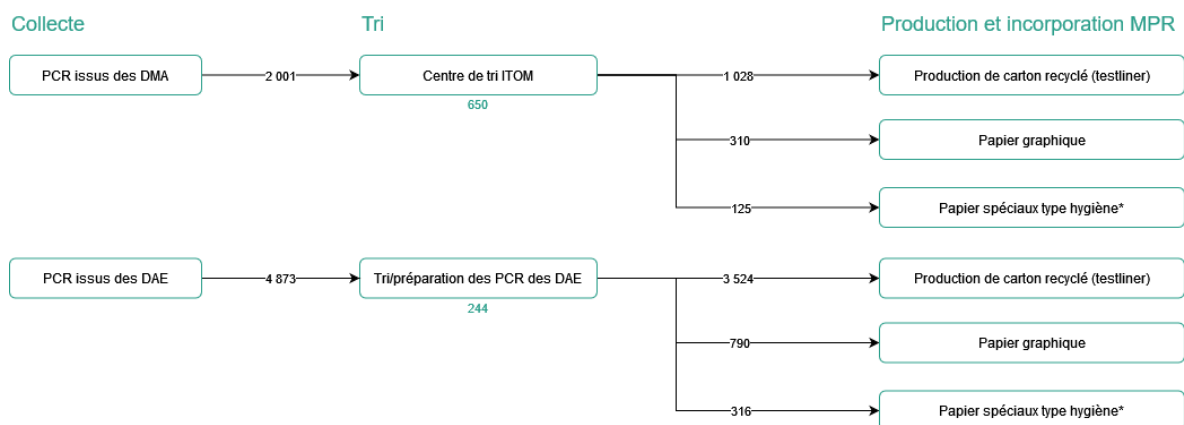
Tableau 3-22 : Origines et tonnages des flux collectés – Papier- carton

Flux par origine	Pourcentage*	Tonnage
Papiers		
Papiers issus des DMA	63 %	995 kt
Papiers issus des DAE	37 %	585 kt
Total	100 %	1 580 kt
Carton		
Cartons issus des DMA	19 %	1 005 kt
Cartons issus des DAE	81 %	4 288 kt
Total	100 %	5 294 kt

*En raison des arrondis, la somme des chiffres significatifs visibles peut conduire à une valeur supérieure ou inférieure à 100 % (99.5% ou 101% par exemple). Se référer aux tonnages pour les proportions exactes.

3.4.2 Étapes du cycle de vie incluses dans le système

Figure 3-7 : Origines et tonnages des flux collectés – Papier- carton



* approximé par la production de carton recyclé (testliner)

Tonnages collectés - FEDEREC 2021 :

- Total collecté : 6 874 kt
- Total recyclé : 6 093 kt

Légende :

- xx : Tonnages entrants et sortants de chaque étape
- xx : Pertes et indésirables imputés au flux à recycler

3.4.3 Données utilisées pour les étapes de collecte, tri et production des MPR

3.4.3.1 Collecte

Tableau 3-23 : Inventaire de l'étape de collecte – Papier-Carton

	Donnée	Source	Inventaire de cycle de vie
Collecte des PCR issus des DMA en porte à porte			
Collecte sélective en porte à porte des PCR	54 km/t en camion benne à ordures	[2]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. <i>Error! Reference source not found.</i>)
Collecte des PCR issus des DAE			
Distance en camion du producteur du déchet vers le centre de tri / recyclage	150 km en camion 14 t charge utile	[1]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. <i>Error! Reference source not found.</i>)

[1] : Hypothèse

[2] : ADEME - Enquête collecte 2007 - Analyse des distances parcourues par les bennes de collecte des ordures ménagères, octobre 2009.

3.4.3.2 Tri

Tableau 3-24 : Inventaire de l'étape de tri – Papier-Carton

	Donnée	Source	Inventaire de cycle de vie
Centre de tri ITOM – DMA			
Consommation électrique	50 kWh / tonne entrante	[1]	Market for electricity, medium voltage, FR, EI v3.7.1
Taux de refus des déchets ménagers (recyclables secs des ordures ménagères)	32.5% des tonnages entrants	[2]	-
Centre de tri / préparation des papier-carton – DAE			
Centre de tri des DAE	20 kWh/t de déchets entrants	[3]	Market for electricity, medium voltage, FR, EI v3.7.1
Taux d'indésirables dans le flux (centre de tri des DAE)	5% dans le flux entrant.	[3]	-

[1]: Environmental and Economic analysis of end-life of packaging in MSW », Eco-emballages, Eco-Embes, Sociedad Ponto Verde and FOST Plus, March 2009

[2] ADEME 2020 - Le traitement des Déchets Ménagers et Assimilés en 2018 (part des tonnages entrant en centre de tri envoyés en UIOM et stockage ISDND)

[3] : FEDEREC - Évaluation environnementale du recyclage en France selon la méthodologie de l'analyse du cycle de vie, mars 2017

3.4.1 Données utilisées pour les étapes d'incorporation des MPR et de production vierge

3.4.1.1 Incorporation des MPR

Les déchets collectés et triés sont ensuite recyclés soit en carton plat ou ondulé soit en papier graphique selon les pourcentages de répartition suivants, issus du BNR 2019²⁰ :

- carton plat : 76 % (tonnages entrants) ;
- carton ondulé : 7 % (tonnages entrants) ;
- papier graphique : 17 % (tonnages entrants).

Les impacts liés à la collecte des PCR ont été retirés des inventaires puisqu'ils sont modélisés tel que présenté en 3.4.3.1.

Pour le carton :

Tableau 3-25 : Inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR – Carton plat et ondulé

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Containerboard production, linerboard, testliner, RER
Technologie modélisée	Production de Testliner 100% recyclé
Représentativité géographique	Les données relatives à la production de Testliner et de Wellenstoff ont été collectées auprès des usines, qui produisent ensemble environ 58 % (14 395 000 tonnes) de la production annuelle totale de papiers pour carton ondulé à partir de papier de récupération en Europe (27 pays de l'UE plus la Norvège et la Suisse).
Représentativité temporelle	Moyenne pondérée des usines de production par tonne de papier net commercialisable et de boîtes en carton ondulé en 2017
Source et année de publication	Ecoinvent v3.7.1 (2022) basé sur FEFCO 2015
Mix électrique	Europe
Quantité de déchets de carton entrants (t / tonne produite)	1.092

Concernant l'incorporation de MPR en vue de la production de papier graphique, les statistiques clés de la Confédération des industries européennes du papier (CEPI) (2021) présentent une répartition entre le débouché papier journal et autres papiers graphiques de 18% et 82% respectivement. Les inventaires sont les suivants :

Tableau 3-26 : Inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR – Papier journal

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	paper production, newsprint, recycled, EU w/o Sweden
Technologie modélisée	Ce module représente la production européenne de papier journal contenant de la pâte désencrée provenant de déchets

²⁰ ADEME. J.Lhotellier. 2019. Analyse du cycle de vie des flux de déchets recyclés sur le territoire français – Rapport. 142 pages.

	de journaux - y compris les déchets de journaux collectés mais non triés, le désencrage de la pâte à papier, la production de papier, la production d'énergie sur site, le traitement interne des eaux usées et le transport des auxiliaires vers la papeterie. Les infrastructures et le transport des matières premières ne sont pas inclus.
Représentativité géographique	La production annuelle française totale est de 1 242 000 tonnes, soit environ 10.4% de la production annuelle des papiers graphiques recyclés (hors journaux) dans l'Union européenne et environ 2.8% de la production mondiale.
Représentativité temporelle	Les données représentent la technologie moyenne à la fin des années 1990 et au début des années 2000. L'inventaire a été publié en 2000 et adapté en 2022.
Source et année de publication	Ecoinvent v3.7.1 (2022)
Mix électrique	Europe
Quantité de déchets de papier entrants (t / tonne produite)	1.11

Tableau 3-27 : Inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR – Autres papiers graphiques

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Graphic paper production, 100% recycled, RER
Technologie modélisée	Ce module comprend la production de papier graphique recyclé - y compris les déchets de papier collectés mais non triés, le désencrage de la pâte à papier, la production de papier, la production d'énergie sur site, le traitement interne des eaux usées et le transport des auxiliaires vers la papeterie. Les infrastructures et le transport des matières premières ne sont pas inclus.
Représentativité géographique	La production annuelle française totale est de 1 242 000 tonnes, soit environ 10.4% de la production annuelle des papiers graphiques recyclés (hors journaux) dans l'union européenne et environ 2.8% de la production mondiale.
Représentativité temporelle	Inventaire représentatif de l'année 2014
Source et année de publication	Ecoinvent v3.7.1 (2022)
Mix électrique	Europe
Quantité de déchets de papier entrants (t / tonne produite)	1.17

3.4.1.2 Production vierge

La production vierge évitée de papier-carton suit les mêmes proportions que présenté en 3.4.1.1, les inventaires sont listés dans les tableaux ci-dessous.

À noter que l'utilisation d'inventaires de production de papier dans des usines intégrées est conservatrice étant donné que les impacts sont plus élevés pour les usines non intégrées.

Tableau 3-28 : Inventaire pour la production vierge évitée – Carton (kraftliner)

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Kraftliner production, RER (European Federation of Corrugated Board Manufacturers (FEFCO) 2015)
Technologie modélisée	Production de Kraftliner 60% d'origine vierge (donnée corrigée à 100% vierge par RDC)
Représentativité géographique	Les données pour la canelure semi-chimique et le Kraftliner représentent environ 85% de la production annuelle totale de papier pour carton ondulé à base de fibres vierges en Europe. Les données pour la canelure semi-chimique et le kraftliner représentent également environ 90 % de la consommation totale de ces grades pour la production de carton ondulé en Europe.
Représentativité temporelle	Moyenne pondérée des usines de production par tonne de papier net commercialisable et de boîtes en carton ondulé en 2017
Source et année de publication	Ecoinvent v3.7.1 (2022) basé sur FEFCO
Mix électrique	Europe

Dans le cas du papier, la production vierge évitée est modélisée suivant les proportions suivantes issues de la confédération des industries européennes du papier (Cepi) :

Tableau 3-29 : Type de papier dont la production est évitée

Type de papier	Pourcentage ²¹
Papier journal :	18 %
Autres papiers graphiques :	82 %
- Pâte à papier mécanique non couchée	24 %
- Pâte à papier mécanique couchée	21 %
- Pâte à papier sans bois non couchée	39 %
- Pâte à papier sans bois couchée	15 %

Au même titre que le carton, les impacts liés à la collecte des PCR ont été retirés des inventaires puisqu'ils sont modélisés tel que présenté en 3.4.3.1.

²¹ Cepi statistics 2021

Tableau 3-30 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – Papier journal

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Paper production, newsprint, virgin, RER
Technologie modélisée	Production européenne de papier journal sans utilisation de pâte désencrée (déchets de papier)
Représentativité géographique	Europe
Représentativité temporelle	Jeu de données représentatif de 2000 et extrapolé à l'année de diffusion de la base de données Ecoinvent 3.7.1 (en 2022)
Source et année de publication	Ecoinvent v3.7.1 (2022)
Mix électrique	Europe

Tableau 3-31 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – Pâte à papier mécanique non couchée

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Paper production, woodcontaining, supercalendered, RER
Technologie modélisée	Production européenne de pâte à papier mécanique non couchée
Représentativité géographique	Europe
Représentativité temporelle	Jeu de données représentatif de 2000 et extrapolé à l'année de diffusion de la base de données Ecoinvent 3.7.1 (en 2022)
Source et année de publication	Ecoinvent v3.7.1 (2022)
Mix électrique	Europe

Tableau 3-32 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – Pâte à papier mécanique couchée

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Paper production, woodcontaining, lightweight coated, RER
Technologie modélisée	Production européenne de pâte à papier mécanique couchée
Représentativité géographique	Europe
Représentativité temporelle	Jeu de données représentatif de 2000 et extrapolé à l'année de diffusion de la base de données Ecoinvent 3.7.1 (en 2022)
Source et année de publication	Ecoinvent v3.7.1 (2022)
Mix électrique	Europe

Tableau 3-33 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – Pâte à papier sans bois non-couchée

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Paper production, woodcontaining, lightweight coated, RER
Technologie modélisée	Production européenne de pâte à papier mécanique couchée
Représentativité géographique	Europe

Représentativité temporelle	Jeu de données représentatif de 2000 et extrapolé à l'année de diffusion de la base de données Ecoinvent 3.7.1 (en 2022)
Source et année de publication	Ecoinvent v3.7.1 (2022)
Mix électrique	Europe

Tableau 3-34 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – Pâte à papier sans bois couchée

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Paper production, woodfree, uncoated, at integrated mill, RER
Technologie modélisée	Production européenne de pâte à papier sans bois non couchée
Représentativité géographique	Europe
Représentativité temporelle	Jeu de données représentatif de 2000 et extrapolé à l'année de diffusion de la base de données Ecoinvent 3.7.1 (en 2022)
Source et année de publication	Ecoinvent v3.7.1 (2022)
Mix électrique	Europe

3.5 Inventaires de cycle de vie de la chaîne de recyclage de la filière plastiques

3.5.1 Origines et tonnages des flux collectés

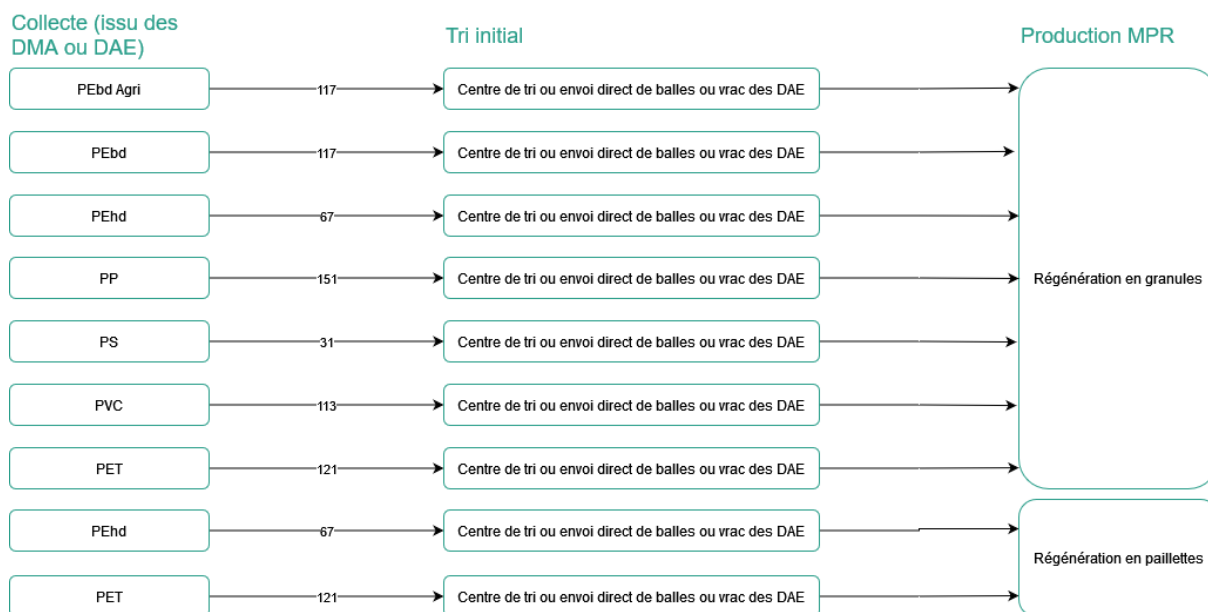
Tableau 3-35 : Origines et tonnages collectés - Plastiques

Flux par origine	Pourcentage*	Tonnage
Plastiques issus des DMA		
PEHD	18 %	68 kt
PEBD – films	9 %	34 kt
PET	61 %	229 kt
PS	3 %	11 kt
PP	10 %	37 kt
Total	100 %	379 kt
Plastiques issus des DAE		
PEHD	10 %	67 kt
PEBD – films	30 %	200 kt
PET	2 %	13 kt
PS	3 %	20 kt
PP	17 %	113.5 kt
PVC	17 %	113.5 kt
Autres (non comptabilisés dans cette étude)	21 %	140 kt
Total	100 %	667 kt

*En raison des arrondis, la somme des chiffres significatifs visibles peut conduire à une valeur supérieure ou inférieure à 100 % (99.5% ou 101% par exemple). Se référer aux tonnages pour les proportions exactes.

3.5.2 Étapes du cycle de vie incluses dans le système

Figure 3-8 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage des plastiques



Tonnage 2021 FEDEREC :

- Total collecté : 906 kt

3.5.3 Données utilisées pour les étapes de préparations en vue de l'incorporation

La production de plastique recyclé (recyclage mécanique) a été approximée sur base d'un ICV suisse de recyclage de PEhd²² auquel la consommation de l'étape d'extrusion a été adaptée. La consommation d'électricité nécessaire à la fonte du polymère a été recalculée sur base de la capacité calorifique et de la température de fusion spécifique des résines concernées par cette étude, à savoir :

- PET
- PEhd
- PEbd
- PP
- PVC
- PS

L'énergie électrique nécessaire à l'extrusion de 1 kg de PEhd a donc été remplacée par la valeur calculée et, dans le cas des résines régénérées sous forme de paillettes (PET et PEhd), cette énergie a été soustraite de l'inventaire.

²² Melanie Haupt et al, Life cycle inventories of waste management processes, 2018

Tableau 3-36 : Inventaire de l'étape de préparation des MPR (en vue de l'incorporation)

	Donnée	Source	Inventaire de cycle de vie
Tri – hors PET			
Taux de pertes et indésirables (dans le flux entrant)	PEbd : 13%, PEbd (agri) : 65%, PEhd (granules) : 23%, PEhd (paillettes) : 19%, PP : 2%, PS : 22%, PVC : 8%.	[5]	-
Consommation de diesel	7.7 l/t entrante	[2]	
Tri – PET			
Taux de pertes et indésirables	PET (granules) : 22%, PET (paillettes) : 30%	[3]	-
Consommation de diesel	2 l/t sortante	[3]	Diesel, burned in building machine, GLO, EI v3.7.1
Consommation d'électricité	18 kWh/t sortante	[3]	Market for electricity, medium voltage, FR, EI v3.7.1
Tri – Tous			
Taux de pertes	10 % du taux de pertes et indésirables	[1]	
Broyage / tri post-broyage / granulation*			
Consommation d'eau	0.34 m ³ /t entrante	[4]	market group for tap water – GLO, EI v3.7.1
Consommation de gaz naturel	240 MJ/t entrante	[4]	market group for heat, district or industrial, natural gas – RER, EI v3.7.1
Consommation d'électricité (par tonne entrante)	PET – granules : 440 kWh/t	[4]*	Market group for electricity, low voltage, Europe w/o Switzerland, EI v3.7.1
	PET – paillettes : 334 kWh/t	[4]*	
	PEhd – granules : 419 kWh/t	[4]*	
	PEhd – paillettes : 334 kWh/t	[4]*	
	PEbd : 414 kWh/t	[4]*	
	PP : 428 kWh/t	[4]*	
	PS : 454 kWh/t	[4]*	
	PVC : 410 kWh/t	[4]*	

[1]: Hypothèse

[2] : Carbotech - Technical report_V1.0 – sorting of PE bottles (2017)

[3] : Ecoinvent 3.7.1

[4] : Melanie Haupt et al, Life cycle inventories of waste management processes, 2018

[4]* : Calculé sur base des données de [4]

[5] : Déduit du document accompagnant les inventaires SRP : Ecoprofil des MPR, décembre 2018 (post-industriel)

3.5.4 Données utilisées pour l'étape de production vierge

Tableau 3-37 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PET

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Polyethylene terephthalate production, granulate, bottle grade, RER
Technologie modélisée	Mix de technologies en Europe, estérification de l'éthylène glycol et de l'acide téréphtalique (PTA)
Représentativité géographique	EU27 + Suisse + Norvège (Couvre 85% PET EU)
Représentativité temporelle	Données d'activité 2015, publié en 2017
Source et année de publication	Ecoinvent 3.7.1 (2022) basé sur Plastics Europe
Mix électrique	Europe

Tableau 3-38 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PEhd

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Polyethylene production, high density, granulate, RER
Technologie modélisée	Mix de technologies en Europe
Représentativité géographique	Europe
Représentativité temporelle	Données d'activité 2011, publié en 2014
Source et année de publication	Ecoinvent 3.7.1 (2022) basé sur Plastics Europe
Mix électrique	Europe

Tableau 3-39 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PEbd

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Polyethylene production, low density, granulate, RER
Technologie modélisée	Mix de technologies en Europe
Représentativité géographique	Europe
Représentativité temporelle	Données d'activité 2011, publié en 2014
Source et année de publication	Ecoinvent 3.7.1 (2022) basé sur Plastics Europe
Mix électrique	Europe

Tableau 3-40 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PP

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Polypropylene production, granulate, RER
Technologie modélisée	Mix de technologies en Europe
Représentativité géographique	UE27 + Suisse + Norvège (76% de la production UE)
Représentativité temporelle	Données d'activité 2011, publié en 2014
Source et année de publication	Ecoinvent 3.7.1 (2022) basé sur Plastics Europe
Mix électrique	Europe

Tableau 3-41 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PVC

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Polyvinylchloride production, suspension polymerisation, RER
Technologie modélisée	Mix de production des technologies commerciales de production de S-PVC, le chlorure de polyvinyle (PVC) est fabriqué par polymérisation du chlorure de vinyle monomère.
Représentativité géographique	Europe (couvre 88% de la capacité de production européenne)
Représentativité temporelle	Données d'activité 2013, publié en 2015
Source et année de publication	Ecoinvent 3.7.1 (2022) basé sur Plastics Europe
Mix électrique	Europe

Tableau 3-42 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PS

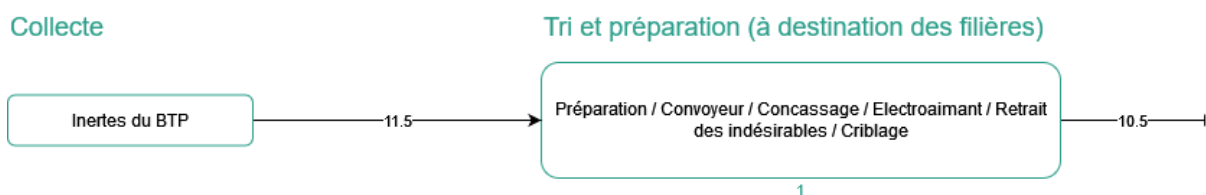
Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Polystyrene granulate (PS)
Technologie modélisée	Mix de technologies en Europe
Représentativité géographique	Europe (couvre 95% de la production de PS EU sur 24 sites)
Représentativité temporelle	Données d'activité 2011
Source et année de publication	Plastics Europe (2015)*
Mix électrique	Europe

* Étant donné le caractère obsolète de l'ICV Ecoinvent (données de 2002), un ICV issu de Plastics Europe a été préféré

3.6 Inventaires de cycle de vie de la chaîne de recyclage des inertes du BTP

3.6.1 Étapes du cycle de vie incluses dans le système

Figure 3-9 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage des inertes du BTP



Tonnages collectés - FEDEREC 2021 :

- Total collecté : 11.5 Mt

Légende :

- xx : Tonnages entrants et sortants de chaque étape
- xx : Pertes et indésirables imputés au flux à recycler

Dans la filière des inertes du BTP, les MPR sont directement et majoritairement utilisées en techniques routières, pour la réalisation de sous-couches ou de remblais. Néanmoins, le bâtiment est également un débouché, pour la réalisation de sous-couche d'ouvrages ou de parkings notamment. En effet, il est difficile de trouver d'autres débouchés en raison des seuils en certaines substances pour des applications dans le bâtiment (ex. : taux de sulfate dans les granulats recyclés) ou en raison des prescriptions

géotechniques contraignantes pour certains ouvrages (ex. : remplacement de ballasts de chemin de fer).

En théorie, la filière décrite sur le schéma en Figure 3-9 devrait être subdivisée en deux filières distinctes :

- La filière des inertes issus du gros œuvre (bétons armés)
- La filière du 2nd œuvre (flux provenant des déchetteries et petits chantiers)

Dans la pratique, il n'est pas possible de différencier ces deux flux étant donné que les données pour la production des MPR des inertes du BTP sont issues des inventaires de cycle de vie publiés par l'Union Nationale des Producteurs de Granulats (UNPG) en 2017, agrégés et non modifiables.

De façon générale, il est considéré que le traitement se fait en deux étapes : une étape de traitement « primaire » de réception, tri et concassage grossier, puis une étape de traitement « secondaire » comprenant du concassage et criblage plus fins, ainsi que du stockage. Majoritairement, la fabrication est assurée à sec et des opérations de tri manuel peuvent être nécessaires pour éliminer les éléments indésirables (plastiques, bois, etc.). Une étape de déferraillage (fer à béton) est également incluse dans ces inventaires (cf. section 3.6.3).

3.6.2 Données utilisées pour les étapes de collecte et de tri initial des DMA

	Donnée	Source	Inventaire de cycle de vie
Distance en camion vers l'étape de production de MPR	150 km en camion 14 t charge utile	[1]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Annexe 1 <i>Error! Reference source not found.</i>)

[1]: Hypothèse

3.6.3 Données utilisées pour les étapes de tri et préparation (à destination des filières)

Tableau 3-43 : Inventaire pour les étapes de tri et préparation (à destination des filières)

Paramètre	Valeur	Source	Inventaire de cycle de vie
Énergie			
Diesel	13.4 MJ/t	[1]	Diesel, burned in building machine, GLO,ecoinvent v2.2
Électricité (procédé)	3.6 kWh/t	[2]	Market for electricity, medium voltage, FR, EI v3.7.1
Électricité (autre)	2.2 kWh/t	[2]	
Infrastructures			
Immobilisations	2.85E-03 m ² /t	[3]	Building, hall, steel construction, CH,ecoinvent v2.2
Bande transporteuse	9.51E-05 m/t	[3]	conveyor belt, at plant, RER,ecoinvent v2.2
Machines	9.51E-02 kg/t	[3]	Industrial machine, heavy, unspecified, at plant, RER,ecoinvent v2.2
Autres			
Caoutchouc	4.00E-03 kg/t	[3]	Synthetic rubber, at plant, RER,ecoinvent v2.2
Huile de lubrification	2.50E-03 kg/t	[3]	Lubricating oil, at plant, RER,ecoinvent v2.2
Déchets d'huile de lubrification	2.50E-03 kg/t	[3]	Disposal, used mineral oil, 10% water, to hazardous waste incineration, CH,ecoinvent v2.2

[1] : Ecoinvent, procédé « Clinker, at plant, CH » (données pour le transport interne hors extraction)

[2] : Aktid, consommations calculées sur base des puissances installées (cf. Annexe 5)

[3] : Ecoinvent, procédé « Gravel, crushed, at mine, CH

Un taux d'indésirables dans le flux entrant de 5% est considéré (hypothèse).

Un taux de perte de 4% est considéré pendant le procédé de recyclage (source : ecoinvent, procédé « gravel, crushed, at mine, CH »).

Les effets de recarbonatation des granulats de béton ne sont pas pris en compte dans cette évaluation.

3.6.4 Données utilisées pour l'étape de production vierge évitée

Tableau 3-44 : Inventaire pour la production de 1 tonne de granulats issus de roches meubles

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Gravel production, crushed, RoW
Technologie modélisée	Production de 1 kg de gravier concassé. Sur la quantité totale (100%) de graviers ronds, concassés et de sable extraits, environ 15% sont des graviers concassés.
Représentativité géographique	Données de mesure de quatre usines suisses. Pour la consommation d'électricité : mesure de 21 usines suisses.
Représentativité temporelle	Données d'activité 2013 et données d'inventaires 2020
Source et année de publication	Ecoinvent 3.7.1 (2020)
Mix électrique	Europe (sans la Suisse)

3.7 Inventaires de cycle de vie de la chaîne de recyclage du bois

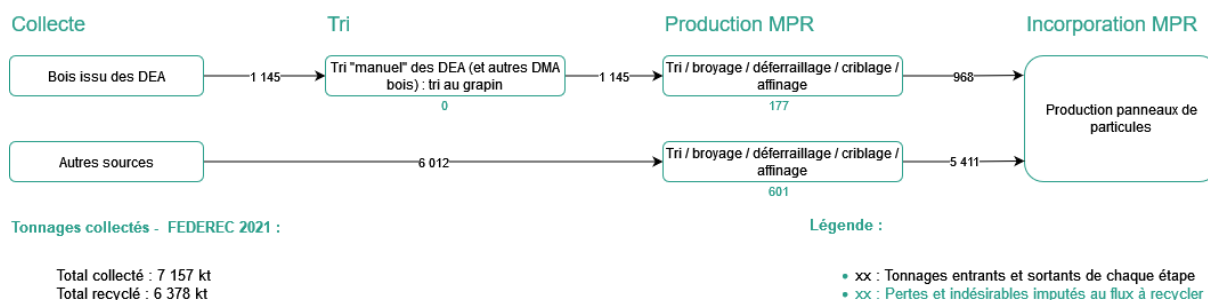
3.7.1 Origines et tonnages des flux collectés

Flux par origine	Pourcentage*	Tonnage
Bois issus des DEA		
Total	100 %	1 145 kt
Autres sources		
Déchets en mélange (DND)	13 %	787 kt
Collecte du SPGD (Déchèteries)	40 %	2 433 kt
Collecte industrielle	20 %	1 217 kt
Bois issus de déchets du bâtiment	18 %	1 074 kt
Filière emballage	8 %	501 kt
Total	100 %	6 012 kt

*En raison des arrondis, la somme des chiffres significatifs visibles peut conduire à une valeur supérieure ou inférieure à 100 % (99.5% ou 101% par exemple). Se référer aux tonnages pour les proportions exactes.

3.7.2 Étapes du cycle de vie incluses dans le système

Figure 3-10 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage du bois



3.7.3 Données utilisées pour les étapes de collecte et de tri « manuel »

3.7.3.1 Collecte

La collecte des métaux est modélisée au moyen des données et hypothèses suivantes (lorsque applicable cf. schéma en 3.7.2) :

Tableau 3-45 : Inventaire de l'étape de collecte – Bois

	Donnée	Source	Inventaire de cycle de vie
Collecte du bois issu des DEA (collecte DMA appliquée à la totalité du flux de DEA collecté)			
Distance en voiture et apport moyen hors gravats	10 km en voiture aller-retour	[1]	market for transport, passenger car, RER, EI v3.7.1
	Apport moyen par visite : 72 kg	[2]	
Distance en camion du point d'apport volontaire vers le centre de tri	150 km en camion 14 t charge utile	[1]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Error! Reference source not found.)
Bois d'autres sources			
Distance en camion du point de dépose vers le centre de démantèlement / dépollution	150 km en camion 14 t charge utile	[1]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Error! Reference source not found.)

[1]: Hypothèse

[2] : Chiffres clés des déchèteries, SINOE, données France 2015.

3.7.3.2 Tri

Cette étape est applicable aux déchets issus des DEA.

Tableau 3-46 : Inventaire de l'étape de tri des DEA

Paramètre	Donnée	Source	Inventaire de cycle de vie
Énergie			
Diesel (grappin)	3.5 MJ/t entrante	[1]	Diesel, burned in building machine, GLO, EI v3.7.1
Électricité (bande porteuse)	15 kWh/t entrante	[2]	Market for electricity, medium voltage, FR, EI v3.7.1

Infrastructures			
Immobilisations	2.85 E-03 m ² /t entrante	[3]	building construction, hall, steel construction, CH, EI v3.7.1
Bande transporteuse	9.51 E-05 m/t entrante	[3]	conveyor belt production, RER, EI v3.7.1
Transport			
Transport jusqu'au site de production des MPR	250 km par camion charge utile 24 t	[2]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Error! Reference source not found.)

[1]: Hypothèse basée sur l'inventaire de cycle de vie « particle board production, uncoated, average glue mix, RER, EI v3.5 » (consommation allouée aux activités de préparation des matières premières et transport interne)

[2]: Hypothèse

[3]: Hypothèse, donnée basée sur l'inventaire de cycle de vie « Gravel production, crushed, CH, EI v3.7.1 »

3.7.4 Données utilisées pour l'étape de production des MPR

Tableau 3-47 : Inventaire de l'étape de production de MPR - Bois

Paramètre	Donnée	Source	Inventaire de cycle de vie
Énergie			
Électricité	100 kWh/t sortante sèche	[1]	Market for electricity, medium voltage, FR, EI v3.7.1
Transport			
Transport jusqu'au site de production des MPR	500 km par camion charge utile 24 t	[3]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Error! Reference source not found.)
Infrastructures			
Immobilisations	4.13E-08 unité / t sortante sèche	[2]	Sawmill construction, EU w/o CH, EI v3.7.1
Machines	5.3E-05 unité / t sortante sèche	[1]	Chipper production, stationary, electric, RER, EI v3.7.1
Machines	4.08E-03 kg / t sortante sèche	[1]	Steel production, low-alloyed, hot rolled, RER, EI v3.7.1
Autres			
Huile de lubrification	2.04E-03 kg/t sortante sèche	[1]	Lubricating oil production, RER, EI v3.7.1
Pertes et indésirables			
DEA	15.5% des tonnages entrants	[4]	-
Autres sources de bois	10% des tonnages entrants	[3]	-

[1]: Wood chipping, industrial residual wood, stationary electric chipper, RER, EI v3.7.1

[2]: Treatment of waste wood, post-consumer, sorting and shredding, CH, EI v3.7.1

[3]: Hypothèse

[4]: Au-Dev-ant, Manuel TrarieuX. ADEME, Chloé HOUDUS. Septembre 2021. *Éléments d'Ameublement : données 2020 – Rapport annuel – 58 pages*

Les déchets de bois issus d'éléments d'ameublement (DEA) contiennent d'autres matériaux que le bois avant l'étape de tri et broyage. Dans cette étude, le taux de refus de tri est défini comme la part de déchets envoyés en centre de stockage (ou incinération sans valorisation énergétique²³). L'impact du transport de ces éléments incombe donc à la filière de recyclage du bois au prorata de la proportion de bois dans les DEA.

Selon le rapport annuel 2020 de la filière DEA de l'ADEME²⁴, 15,5% du flux collecté est incinéré. On considère donc 15,5% de refus (ou éléments non valorisables) des tonnages entrants. À noter que les valeurs utilisées s'appliquent à l'ensemble des DEA (matelas compris) et ne sont pas spécifiques aux meubles contenant du bois.

3.7.5 Données utilisées pour les étapes de d'incorporation des MPR et de production vierge

L'inventaire de cycle de vie de la production de panneaux de particules à partir de déchets de bois (incorporation des MPR) se base sur l'inventaire de production de panneaux de particules à partir ressource vierge décrit ci-dessous :

Tableau 3-48 : Inventaire de l'étape de production vierge évitée – Bois

Paramètre	Donnée	Source	Inventaire de cycle de vie
Origine moyenne du bois			
Bûches (Roundwood)	45%	[1]	Market for wood chips, wet, measured as dry mass, EU w/o SW, EI v3.7.1
Résidus forestiers (petits arbres, de branches, de cimes...)	22%		market for slab and siding, softwood, wet, measured as dry mass, EU w/o SW, EI v3.7.1
Sciures de bois	24%		Market for sawdust, wet, measured as dry mass, EU w/o SW, EI v3.7.1
Résidus de production externes	10%		Market for wood chipping, industrial residual wood, stationary electric chipper, GLO, EI v3.7.1
Bois post-consommateur	0%		-
Consommations d'énergie / eau			
Électricité	Séchage : 10 à 90 kWh/m ³ panneau fini	[1]	Market for electricity, medium voltage, FR, EI v3.7.1
	Pressage : 20 à 60 kWh/m ³ panneau fini		
	Autres étapes : 40 à 90 kWh/m ³ panneau fini		

²³ La valorisation énergétique à haut rendement (comme la fraction qui part en CSR) est simplement exclue du champ de l'étude car non étudiée.

²⁴ Au-Dev-ant, Manuel TrarieuX. ADEME, Chloé HOUDUS. Septembre 2021. Eléments d'Ameublement : données 2020 – Rapport annuel – 58 pages

Chaleur	Séchage : 170 à 860 kWh/m ³ panneau fini		Heat production, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW, EU w/o SW, EI v3.7.1
	Pressage : 50 à 140 kWh/m ³ panneau fini		
	Autres étapes : 0 à 730 kWh/m ³ panneau fini		
Proportion de chaleur provenant des déchets de bois de sciage des panneaux	1/3	[2]	Heat production, softwood chips from forest, at furnace 1 000kW, EU w/o SW, EI v3.7.1
Eau	0.02 à 0.88 m ³ /m ³ de panneau fini	[1]	Market for tap water, EU w/o SW, EI v3.7.1
			Treatment of wastewater from particleboard production, capacity 5E9l/year, RER, EI v3.7.1

[1] : Pourcentages recalculés hors bois post-consommateur : Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Wood-based Panels, 2016

[2] : James B. Wilson, Life-cycle inventory of particleboard in terms of resources, emissions, energy and carbon, Oregon State University, April 2009

Selon le BREF 2016 sur les panneaux de particules, l'énergie théorique à l'étape de séchage avec des copeaux de bois issus du recyclage est au moins deux fois inférieure qu'avec des copeaux de bois issus de forêts.

« La demande théorique en énergie pour l'étape de séchage peut être exprimée comme la chaleur latente pour l'évaporation qui, pour le bois, est de 2260 kJ/kg. Sécher 1 tonne de bois à 60% d'humidité pour arriver à 3% d'humidité requiert 1.3 GJ. Proportionnellement, la même quantité de bois demande moins de la moitié d'énergie, en raison d'un taux d'humidité plus bas du bois recyclé ».

Pour un panneau contenant 535 kg bois / m³²⁵, la consommation de chaleur évitée est de 348 MJ/m³ panneaux finis, soit 97 kWh/m³ panneaux finis.

L'inventaire d'incorporation de MPR pour la filière bois correspond donc aux données listées dans le Tableau 3-48, à la différence près que la matière première est constituée de déchets de bois collectés et triés et non plus des pourcentages listés dans « origine moyenne du bois ». La consommation d'énergie de la sous-étape de séchage est également adaptée au moyen du calcul ci-dessus.

3.8 Taux de substitution aux matières premières d'origine vierge

Les inventaires de cycle de vie des matériaux d'origine vierge sont sur un périmètre « cradle-to-gate », c'est-à-dire de l'extraction des matières premières au produit fini ou semi-fini (aux portes de l'usine).

Le produit d'origine vierge est au même niveau de transformation que le produit d'origine recyclé. Cependant, le matériau d'origine recyclée, bien que remplissant les mêmes fonctions que le matériau d'origine vierge, ne se substitue pas toujours complètement. En effet, il est parfois nécessaire d'utiliser une quantité de matériau d'origine recyclée supérieure au matériau vierge pour atteindre les mêmes caractéristiques techniques.

²⁵ Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Wood-based Panels, 2016

Un **taux de substitution** est donc appliqué. Ce paramètre correspond au rapport entre la qualité du matériau recyclé et le matériau d'origine vierge au point de substitution ; c'est-à-dire lorsque le niveau de transformation de la matière recyclée permet une utilisation dans des applications équivalente à la matière première vierge.

Filière de recyclage	Taux de substitution	Source
Acier	1	Commission recommendation on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations v2.1, 16.12.2021 (Annex C)
Cuivre	1	
Aluminium	1	
Plomb	1	
Zinc	1	
Verre	1	
Papier-carton (recyclage pour usage en emballages et conditionnement)	0.9	Les recommandations de la commission préconisent 1 si les pertes du procédé de recyclage sont comptabilisées et 0.85 si elles ne le sont pas. Dans cette étude, les pertes sont comptabilisées cependant, dans le cas du recyclage pour des usages en emballage et conditionnement, le matériau recyclé peut perdre de ces propriétés mécaniques (c'est le cas pour l'emballage en carton recyclé). Une valeur de 0.9 est donc appliquée.
Papier-carton (recyclage pour usage graphique)	1	
PET (procédé SSP - granules)	1	Commission recommendation on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations v2.1, 16.12.2021 (Annex C)
PET (recyclage mécanique - paillettes), PP, PEhd	0.9	
PEbd	0.75	
PS, PVC	0.9	Hypothèse
Granulats	1	
Bois	1	

3.9 Inventaire de cycle de vie de la collecte et de la fin de vie évitée

Outre l'évitement d'une production de matière vierge, la filière recyclage permet également d'éviter un traitement final des flux recyclés comprenant l'opération de transport et l'opération de traitement (cf. Figure 2-2 : Frontières du système).

3.9.1 Collecte évitée

Tableau 3-49 : Inventaire du système « collecte évitée »

	Donnée	Source	Inventaire de cycle de vie
VHU			
Distance en voiture jusqu'au point de dépose	10 km en voiture	[1] [4]	Market for transport, passenger car, RER, EI v3.7.1

	Apport moyen par visite : 1 100.4 kg		
Distance en camion du point de dépose vers le centre de démantèlement / dépollution	150 km en camion 14 t charge utile	[1]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Error! Reference source not found.)
Emballages ménagers (collecte en porte à porte)			
Collecte sélective en porte à porte hors verre	12 km/t en camion benne à ordures	[3]	Modélisation d'une benne à ordures ménagères détaillée en Error! Reference source not found.
Tous les flux de DMA hors emballages ménagers et VHU			
Distance en voiture et apport moyen hors gravats	10 km en voiture aller-retour Apport moyen par visite : 72 kg	[1] [2]	Market for transport, passenger car, RER, EI v3.7.1
Distance en camion du point d'apport volontaire vers le centre de tri	150 km en camion 14 t charge utile	[1]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Error! Reference source not found.)
Flux de DAE			
Distance en camion du producteur du déchet vers le centre de tri / recyclage	150 km en camion 14 t charge utile	[1]	Modélisation du transport avec COPERT 5 (cf. Error! Reference source not found.)

[1] : Hypothèse

[2] : Chiffres clés des déchèteries, SINOE, données France 2015.

[3] : ADEME - Enquête collecte 2007 - Analyse des distances parcourues par les bennes de collecte des ordures ménagères, octobre 2009.

[4] : Rapport annuel de l'Observatoire de la filière des véhicules hors d'usage - Données 2018 (Poids moyen d'un VHU)

3.9.2 Fin de vie évitée

La définition du scénario de traitement final évité n'est pas aisée pour différentes raisons :

- Certaines filières de recyclage sont implantées en France depuis longtemps et le traitement final alternatif n'existe plus (par exemple, les métaux ferreux sont recyclés et les filières de traitement des déchets sont organisées pour récupérer ces métaux ferreux).
- Les données sur le type de traitement final des DAE ne sont pas toujours disponibles, à l'inverse des DMA.

Deux situations d'évitement sont étudiées dans ce document²⁶ :

- L'évitement de la mise en installation de stockage :
 - DMA : 100% dans les cas des déchets non combustibles (hors verre d'emballage), 28% dans le cas des déchets combustibles et verre d'emballage ;

²⁶ ITOM 2020, calculé sur base de la répartition des déchets réceptionnés selon leurs nature.

- DAE : 100% dans les cas des déchets non combustibles, 68% dans le cas des déchets combustibles.
- L'évitement de l'incinération (avec taux de valorisation énergétique moyen français) :
 - DMA : 0% dans les cas des déchets non combustibles (hors verre d'emballage), 72% dans le cas des déchets combustibles et verre d'emballage ;
 - DAE : 0% dans les cas des déchets non combustibles, 32% dans le cas des déchets combustibles

Remarque : le verre d'emballage étant très majoritairement un DMA, un évitement d'un mix incinération et stockage est modélisé, correspondant à la destination des ordures ménagères résiduelles²⁷.

3.9.2.1 Inventaires utilisés pour les traitements finaux évités

Les inventaires de cycle de vie utilisés pour modéliser les traitements finaux évités sont présentés dans le tableau suivant.

²⁷ Cette hypothèse a très peu d'influence sur les résultats. Le verre n'étant pas combustible, il finira dans les mâchefers à destination du stockage.

Tableau 3-50 : Traitement finaux évités

Filière de recyclage	Inventaires de cycle de vie selon la destination	
	Cas de base	Scénario alternatif
Ferrailles	Treatment of scrap steel, inert material landfill, EU w/o CH, EI v3.7.1	-
Cuivre		-
Aluminium	Treatment of waste aluminium, sanitary landfill, RoW, EI v3.7.1	-
Zinc		-
Plomb	Treatment of lead smelter slag, residual material landfill, GLO, EI v3.7.1	-
Verre	Treatment of waste glass, sanitary landfill, GLO, EI v3.7.1	treatment of waste glass, municipal incineration, , EI v3.7.1
Papier et carton	Treatment of waste paperboard, sanitary landfill, RoW, EI v3.7.1 + <i>valorisation du biogaz</i>	Treatment of waste paperboard, municipal incineration, RoW, EI v3.7.1 + <i>valorisation énergétique</i>
PET	Treatment of waste polyethylene terephthalate, sanitary landfill, RoW, EI v3.7.1	Treatment of waste polyethylene terephthalate, municipal incineration, RoW, EI v3.7.1+ <i>valorisation énergétique</i>
PEhd, PEbd	Treatment of waste polyethylene, sanitary landfill, RoW, EI v3.7.1	Treatment of waste polyethylene, municipal incineration, RoW, EI v3.7.1 + <i>valorisation énergétique</i>
PP	Treatment of waste polypropylene, sanitary landfill, RoW, EI v3.7.1	Treatment of waste polypropylene, municipal incineration, RoW, EI v3.7.1+ <i>valorisation énergétique</i>
PS	Treatment of waste polystyrene, sanitary landfill, RoW, EI v3.7.1	Treatment of waste polystyrene, municipal incineration, RoW, EI v3.7.1+ <i>valorisation énergétique</i>
PVC	Treatment of waste polyvinylchloride, sanitary landfill, RoW, EI v3.7.1	Treatment of waste polyvinylchloride, municipal incineration, RoW, EI v3.7.1+ <i>valorisation énergétique</i>
Granulats	Treatment of inert waste, inert material landfill, RoW, EI v3.7.1	-
Bois	Treatment of waste wood, untreated, sanitary landfill, RoW, EI v3.7.1 + <i>valorisation du biogaz</i>	Treatment of waste wood, untreated, municipal incineration, RoW, EI v3.7.1 + <i>valorisation énergétique</i>

3.9.2.2 Valorisation énergétique de l'incinération

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du déchet est valorisé sous forme de chaleur. Cette chaleur peut être convertie en énergie thermique et/ou électrique.

Pour chaque déchet, la production d'énergie lors du processus d'incinération est calculée de la manière suivante et les données utilisées sont présentées en Tableau 3-51 :

$$\text{Énergie thermique valorisée} = \text{PCI} * \eta_{\text{thermique}} * \text{taux de débouché chaleur}$$

avec :

- $\eta_{\text{thermique}}$ = rendement brut de récupération thermique à l'incinération ;
- taux de débouché chaleur = chaleur vendue trouvant un consommateur final.

$$\text{Énergie électrique valorisée} = \text{PCI} * \eta_{\text{électrique}} * \text{taux de débouché électrique}$$

avec :

- $\eta_{\text{électrique}}$ = rendement brut de récupération électrique à l'incinération ;
- taux de débouché électrique = électricité consommée par l'incinérateur ou effectivement vendue sur le réseau.

Tableau 3-51 : Rendements énergétiques de l'incinération

Paramètre	Valeur France
$\eta_{\text{thermique}}$ * taux de débouché chaleur	0.313
$\eta_{\text{électrique}}$ * taux de débouché électrique	0.071
Source	[1]

[1] : Beylot, A., Muller, S., Descat, M., Ménard, Y., Michel, P. 2017. L'outil WILCI pour l'Analyse du Cycle de Vie de l'incinération des Déchets Ménagers et Assimilés en France. Rapport final du projet de recherche PCI. 80 pages.

L'électricité produite par valorisation énergétique se substitue au mix électrique français au moyen de l'inventaire " market for electricity, high voltage, FR, EI v3.7.1 ".

Dans le cas de la chaleur industrielle, c'est le mix moyen présenté ci-dessous qui a été utilisé :

Tableau 3-52 : Mix chaleur d'origine fossile (source : IEA – données 2021)²⁸

Ressource fossile	Pourcentage	Inventaire (Ecoinvent v3.7.1)
Gaz naturel	94%	Heat, district or industrial, natural gas, EU w/o CH
Fioul	1%	Heat production, light fuel oil, at boiler 100kW, non-modulating, EU w/o CH
Charbon	5%	Heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW, EU w/o CH

²⁸ Topic : heat and electricity generation, heat by source <https://www.iea.org/countries/france>

Les PCI des déchets incinérés sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 3-53 : PCI des matériaux concernés par le scénario incinération (source : Ecoinvent)

Matériau	PCI (MJ/kg) sur masse sèche*
PEhd, PEbd	42.5
PET	22.9
PP	38.9
PS	38.7
PVC	21.5
Papier / carton (7% d'humidité)	16.5
Bois (7% d'humidité)	15.8

* Sauf si précisé

3.9.2.3 Dégradation du carbone organique et émissions de méthane biogénique en installation de stockage

Les formules appliquées pour déterminer la quantité de méthane biogénique (CH₄b) et dioxyde de carbone biogénique (CO₂b) émis en raison de la dégradation anaérobie du déchet (à 100 ans) sont les suivantes :

$$CH_4b \text{ émis} = DOC * DOCf * (1-BC) * 16/12 * (1-Ox) * F$$

$$CO_2b \text{ émis} = (1-F) * (DOC * DOCf * 44/12 * BC + DOC * DOCf * (1-BC) * 44/12 * Ox)$$

Avec :

- DOC : carbone organique dégradable contenu dans le déchet ;
- DOCf : fraction de carbone organique dégradable se décomposant ;
- BC : part de biogaz capté (0.7 : hypothèse) ;
- Ox : facteur d'oxydation du méthane (0.1 : valeur recommandée par défaut dans les Lignes Directrices 2006 du GIEC pour les décharges anaérobies) ;
- F = fraction de CH₄ dans le biogaz capté (0.5 : valeur recommandée par défaut dans les Lignes Directrices 2006 du GIEC).

Tableau 3-54 : Valeurs de DOC et DOCf retenues pour l'étude

Matériau	DOC (kg C/kg matériau sec)	DOCf (%)
Papier graphique mécanique non couché	0.273	40%
Papier graphique mécanique couché	0.234	40%
Papier graphique sans bois non couché	0.279	40%
Papier graphique sans bois couché	0.215	40%
Papier journal	0.367	40%
Carton <i>Kraftliner</i>	0.426	40%
Bois (panneaux de particule)	0.41	10%

Source	Valeur de l'inventaire de cycle de vie de production des matières première d'Ecoinvent v3.7.1 cité dans le chapitre 3.4 et 3.7 pour les PCR et le bois respectivement	Cf. Error! Reference source not found. et Error! Reference source not found. ci-dessous
--------	---	---

Tableau 3-55 : Sources de données pour déterminer la valeur de DOCf du PCR

Publication	Taux de dégradation (%) du carbone organique dégradable	
	Min	Max
[1]	16%	32%
[2]	50%	
Valeur retenue	30%	

[1]: Calculation Tool for waste disposal, For ecoinvent LCI database v3

[2] : Valeur recommandée par défaut dans les Lignes Directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux

Tableau 3-56 : Sources de données pour déterminer la valeur de DOCf du bois

Publication	Taux de dégradation (%) du carbone organique dégradable	
	Min	Max
[1]	1,12%	15,11%
[2]	7,9%	
[3]	10%	
[4]	17%	18%
[5]	2%	
Valeur retenue	10%	

[1]: PADGETT, JENNIFER. *Biodegradability of Wood Products under Simulated Landfill Conditions*. (Thesis Under the direction of Dr. Morton A. Barlaz), 2009.

[2]: Xiaoming Wang, Jennifer M. Padgett, Florentino B. De la Cruz, Morton A. Barlaz. *Wood Biodegradation in Laboratory-Scale Landfills*. *Environ. Sci. Technol.* 2011, 45, 16, 6864-6871 (<https://doi.org/10.1021/es201241q>)

[3]: Kai-Uwe Heyer *, Karsten Hupe and Rainer Stegmann, *ADAPTATION OF IPCC DEFAULT VALUES ON NATIONAL LANDFILL CONDITIONS*, IFAS, Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft, Prof. R. Stegmann und Partner, Hamburg, Germany, 2018

[4]: F.A. Ximenes, W.D. Gardner, A.L. Cowie, *The decomposition of wood products in landfills in Sydney, Australia*, 2008.

[5]: Calculation Tool for waste disposal, For ecoinvent LCI database v3

3.9.2.4 Récupération et valorisation énergétique du méthane des centres de stockage

Il est considéré un taux de captation de 70% du méthane produit par l'installation de stockage (paramètre « BC » cité précédemment) :

- sur ces 70%, il est considéré que 75% est valorisé énergétiquement (hypothèse) ;
- un rendement technique de 25% est appliqué pour la transformation en électricité.

Remarque : même si, en pratique, le biogaz peut être valorisé vers d'autres débouchés, il a été considéré que le principal débouché est la production d'électricité en centrale thermique permettant l'évitement d'une production électrique équivalent au mix national.

4 Évaluation de la qualité des données

4.1 Méthode

Lors de la réalisation d'une analyse du cycle de vie, des choix sont réalisés pour modéliser un processus entre l'utilisation de données primaires, spécifiques, ou l'utilisation de données secondaires, c'est-à-dire des données d'inventaires issues de bases de données ou d'autres sources.

Ce choix est réalisé en cohérence avec les objectifs de l'étude, le champ de l'étude et les choix méthodologiques définis dans l'étude. Plusieurs éléments entrent donc dans le choix d'un inventaire, comme le besoin en données ayant la meilleure représentativité technologique, géographique et temporelle. Cependant, la cohérence méthodologique est également un point essentiel pour permettre de dresser des conclusions robustes répondant aux objectifs de l'étude.

Pour répondre à ces choix méthodologiques, il est parfois nécessaire de compléter ou d'adapter la modélisation d'un inventaire de cycle de vie. C'est généralement le cas des traitements de fin de vie comme l'incinération auxquels on ajoute la modélisation de la valorisation énergétique pour que le principe d'extension des frontières du système soit respecté. Plus généralement, les adaptations méthodologiques sont possibles avec les inventaires de cycle de vie dont les données de modélisation sont accessibles (inventaires désagrégés). Les adaptations nécessaires pour le besoin de l'étude ne sont donc pas possibles lorsque l'inventaire de cycle de vie est agrégé (inventaire « boîte noire ») ou lorsque les règles méthodologiques appliquées pour l'inventaire ne sont pas connues (manque de transparence).

L'analyse de la qualité des données permet donc d'appuyer les conclusions de l'étude. Selon la norme ISO 14 044, cette analyse permet une « *meilleure compréhension de la fiabilité de l'ensemble des résultats d'indicateurs et du profil de l'évaluation de l'impact* ». Cette étape permet de « *mieux comprendre la portée, l'incertitude et la sensibilité des résultats* » lors de la phase d'évaluation de l'impact du cycle de vie.

Une évaluation semi-quantitative est réalisée en suivant la procédure suivante :

1. classer les inventaires de cycle de vie par ordre décroissant des contributions sur le cycle de vie pour toutes les catégories d'impacts étudiées. Ce classement est réalisé indépendamment sur chaque filière ;
2. identifier les inventaires contributeurs pour au moins 80% des impacts sur chaque catégorie d'impact pertinente ;
3. évaluer la qualité des données par un jugement semi-quantitatif basé sur cinq critères :
 - quatre relatifs aux données :
 - représentativité temporelle (TiR) ;
 - représentativité technologique (TeR) ;
 - représentativité géographique (GR) ;
 - complétude (C).
 - un relatif à la méthodologie suivie pour l'établissement de l'inventaire :
 - pertinence et cohérence méthodologiques (M).

Cinq niveaux de qualité sont définis pour chaque critère :

- très bon (1) ;
- bon (2) ;
- équitable (3) ;
- faible (4) ;
- très faible (5).

La description des critères est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 4-1 : Critères d'évaluation de la qualité des données

TeR	Représentativité technologique	La mesure dans laquelle le jeu de données reflète périmètre technologique
TiR	Représentativité temporelle	La mesure dans laquelle le jeu de données reflète les conditions particulières du système considéré en ce qui concerne l'âge des données.
GR	Représentativité géographique	La mesure dans laquelle le jeu de données reflète le périmètre géographique
C	Complétude	Ce paramètre évalue le niveau de couverture des catégories d'impacts étudiées par les flux élémentaires listés dans l'inventaire de cycle de vie
M	Pertinence et cohérence méthodologiques	Ce paramètre évalue si les méthodes et les choix méthodologiques appliqués par le LCI sont compatibles avec le but, le périmètre et la méthodologie de l'étude, en particulier son application prévue pour étayer les décisions/conclusions

Le critère de représentativité temporelle est basé sur la moyenne des deux sous-critères suivants :

- l'écart entre l'année de référence de l'étude et la fin de la période de validité de l'inventaire de cycle de vie (TiR dataset validity) ;
- l'écart entre l'année de référence de l'étude et l'année de référence de l'inventaire de cycle de vie²⁹ (TiR reference year).

$$TiR (moyen) = \frac{TiR \text{ dataset validity} + TiR \text{ reference year}}{2}$$

Le critère de pertinence et cohérence méthodologique est basé sur le respect des 9 règles méthodologiques suivantes :

Tableau 4-2 : Critère d'évaluation de la cohérence méthodologique avec la présente étude

Frontières du système et coupure du système	Les limites du système comprennent tous les processus liés à la chaîne de production et la coupure du système n'est pas réalisée à moins qu'elle soit justifiée comme négligeable sur les catégories d'impacts couvertes par l'étude
Gestion des processus multifonctionnels	La hiérarchie décisionnelle doit être suivie pour résoudre la multifonctionnalité (hiérarchie des normes ISO 14040-44) : (1) subdivision ou expansion du système ; (2) attribution fondée sur une relation physique sous-jacente pertinente (la substitution peut s'appliquer ici) ; (3) attribution fondée sur une autre relation.

²⁹ Année des données collectées ou année représentative des données utilisées pour produire l'inventaire de cycle de vie

La base de données d'arrière-plan de l'inventaire correspond à celle de l'étude	Les données d'arrière-plan sont issues de la même base de données que celle utilisée dans l'étude (Ecoinvent v3)
Une revue critique a été réalisée	Une revue critique par un expert ACV indépendant a été réalisée ou une procédure de vérification a été mise en place
Nomenclature ILCD ou Ecos-pold	La nomenclature ILCD ou Ecos-pold est utilisée
Emissions et captation de carbone biogénique et fossile	Les absorptions et les émissions doivent être déclarées séparément pour les sources fossiles et les sources biogéniques.
Compensation des émissions	Ne doit pas être inclus
Mix électrique national moyen	Le mix électrique utilisé est le mix attributionnel national moyen
Inclusion des bâtiments et infrastructures	Les bâtiments et infrastructures sont prises en compte dans l'inventaire de cycle de vie

La grille de notation est présentée en Annexe 3.

Les critères de notation des inventaires de cycle de vie sont les suivants :

Note	TiR	TeR	GR	M	C
1	Moins de 2 ans par rapport à l'année de référence ou la fin de la période de validité	La technologie visée par l'étude est exactement la même que celle du jeu de données	Le procédé modélisé dans l'étude se déroule dans le pays représenté dans le jeu de données	Le procédé modélisé dans l'étude respecte toutes règles méthodologiques listées	L'inventaire couvre tous les indicateurs évalués dans l'étude
2	Moins de 5 ans par rapport à l'année de référence ou la fin de la période de validité	La technologie visée par l'étude est couverte par le mix de technologies représenté dans le jeu de données	Le procédé modélisé dans l'étude se déroule dans la zone géographique représentée dans le jeu de données	Le procédé modélisé dans l'étude respecte 7 des 8 règles méthodologiques listées	L'inventaire couvre 90% des indicateurs évalués dans l'étude
3	Moins de 10 ans par rapport à l'année de référence ou la fin de la période de validité	La technologie visée par l'étude est partiellement couverte par le périmètre du jeu de données	Le procédé modélisé dans l'étude se déroule dans une des zones géographiques couverte par le jeu de données	Le procédé modélisé dans l'étude respecte 6 des 8 règles méthodologiques listées	L'inventaire couvre 80% des indicateurs évalués dans l'étude
4	Moins de 15 ans par rapport à l'année de référence ou la fin de la période de validité	La technologie visée par l'étude est similaire à celle du périmètre du jeu de données	Le procédé modélisé dans l'étude se déroule dans une zone géographique qui n'est pas couverte par le jeu de données mais il y a des similarités suffisantes à dire d'expert	Le procédé modélisé dans l'étude respecte 5 des 8 règles méthodologiques listées	L'inventaire couvre 70% des indicateurs évalués dans l'étude
5	Plus de de 15 ans par rapport à l'année de référence ou la fin de la période de validité	La technologie visée par l'étude est différente de celle du périmètre du jeu de données	Le procédé modélisé dans l'étude se déroule dans une zone géographique différente de celle couverte par le jeu de données	Le procédé modélisé dans l'étude respecte moins de 5 règles méthodologiques listées	L'inventaire couvre moins de 70% des indicateurs évalués dans l'étude

Remarque : cette grille s'inspire largement des grilles de notation de la qualité des données utilisées pour les études PEF (Product Environmental Footprint) de la Commission Européenne.

La note de qualité obtenue à l'issue de l'évaluation de chaque inventaire permet de juger de la qualité générale de l'étude en fonction des données d'inventaires utilisées :

Tableau 4-3 : Critère d'évaluation de la note globale des inventaires de cycle de vie

Cote globale de la qualité des données	Niveau global de qualité des données
≤ 1.6	Excellente qualité
> 1.6 et ≤ 2.0	Très bonne qualité
> 2.0 et ≤ 3.0	Bonne qualité
> 3 et ≤ 4.0	Qualité satisfaisante
> 4	Qualité insuffisante

Comme l'a montré l'analyse des résultats, le niveau de qualité général peut cacher des problématiques spécifiques sur certains indicateurs liés à des flux approximativement implémentés dans les inventaires de cycle de vie (incertitude plus élevée sur quelques indicateurs).

Par ailleurs, les méthodes de caractérisation évoluent et la pertinence des résultats dépend des méthodes disponibles à la date de création de l'inventaire. Par exemple, c'est le cas de la dernière méthode sur les émissions de particules publiée par le JRC : le choix de considérer un principe de précaution sur les particules dont le compartiment d'émission n'est pas spécifié donne une importance plus élevée à ce choix qu'à l'époque de la création de l'inventaire.

4.2 Évaluation de la qualité des données

Les notes de qualité des données attribuées aux inventaires sont présentées dans le tableau suivant :

Nom de l'inventaire de cycle de vie	TiR - dataset validity	TiR - reference year	TiR	TeR	Gr	M	C	Total
Transport by Truck, Articulated, RER, RDC modelling (COPERT 5 emissions)	1	3	2	1	2	1	2	1.6
market for transport, passenger car, RER, EI v3.7.1	1	3	2	1	2	1	2	1.6
market group for electricity, medium or high voltage, RER, EI v3.7.1	1	3	2	1	2	1	2	1.6
Steel scrap benefits, RER, worldsteel 2019 (données 2017)	2	2	2	2	3	2	2	2.2
Treatment of aluminium scrap, at refiner, RER	1	5	3	1	2	1	2	1.8
Aluminium production, primary, ingot - IAI Area, EU27 & EFTA	1	3	2	1	2	1	2	1.6
Treatment of copper scrap by electrolytic refining, RER, EI v3.7.1	1	5	3	5	2	1	2	2.6
Copper cathode, 99.99%, Copper Alliance	1	2	1.5	2	2	3	3	2.3
Secondary route lead production, RER, ILA 2017	1	2	1.5	1	2	3	2	1.9
Primary route lead production, GLO, ILA 2017	1	2	1.5	1	3	3	2	2.1
Production de zinc recyclé : approche par modélisation du zinc vierge auquel certaines étapes sont supprimées	1	3	2	5	2	2	2	2.6

zinc oxide production, RER, EI v3.7.1 (modifié)	1	5	3	3	2	2	2	2.4
Primary zinc production from concentrate, RoW, EI v3.7.1	1	3	2	1	2	2	2	1.8
Verre creux : évitements grâce à l'intégration de calcin	3	3	3	2	2	1	2	2.0
Verre plat : évitements grâce à l'intégration de calcin	3	3	3	2	2	1	2	2.0
Testliner production, RER, EI v3.7.1 (rapport FEFCO 2015)	1	2	1.5	1	2	2	2	1.7
paper production, newsprint, recycled, EU w/o CH, EI v3.7.1	1	3	2	3	2	1	2	2.0
Graphic paper, 100% Recycled, RER, EI v3.7.1	1	5	3	3	2	1	2	2.2
Paper production, newsprint, virgin, RER, EI v3.7.1	1	5	3	3	2	1	2	2.2
Paper production, woodcontaining, supercalendered, RER, EI v3.7.1 (Uncoated Mechanical)	1	5	3	3	2	1	2	2.2
Paper production, woodcontaining, lightweight coated, RER, EI v3.7.1 (Coated Mechanical)	1	5	3	3	2	1	2	2.2
Paper production, woodfree, uncoated, at integrated mill, RER, EI v3.7.1	1	5	3	3	2	1	2	2.2
Paper production, woodfree, coated, at integrated mill, RER, EI v3.7.1	1	5	3	3	2	1	2	2.2
Kraftliner production (adapted 100% virgin), RER, EI v3.7.1 (rapport FEFCO 2015)	1	2	1.5	3	2	2	2	2.1
Modélisation RDC – recyclage de polymères	2	3	2.5	1	1	1	2	1.5
Polyethylene production, high density, granulate, RER	1	4	2.5	1	2	1	2	1.7
Polyethylene production, low density, granulate, RER	1	4	2.5	1	2	1	2	1.7
Polyethylene terephthalate production, granulate, bottle grade, RER	1	3	2	1	2	1	2	1.6
Polypropylene production, granulate, RER	1	4	2.5	1	2	1	2	1.7
Polyvinylchloride production, suspension polymerisation, RER	1	3	2	1	2	1	2	1.6
Polystyrene granulate (PS)	2	4	3	1	2	3	2	2.2
Modélisation RDC – recyclage de granulats	2	2	2	1	1	1	2	1.4
Gravel production, crushed	2	2	2	1	1	1	2	1.4
Inventaire de production des MPR à partir de déchets de bois: Tri / broyage / déferrailage / criblage / affinage	1	2	1.5	3	2	1	3	2.1
Production de panneaux de particules recyclées	3	3	3	3	2	1	3	2.4

Panneau de particules à partir de bois (100% vierge)	3	2	2.5	2	2	1	3	2.1
Fin de vie évitée : Incinération et enfouissement, EI v3.7.1	1	5	3	2	2	1	2	2.0

4.3 Incertitude associée à la qualité des données

4.3.1 Méthodologie

L'analyse d'incertitude s'est déroulée selon la méthode Monte-Carlo :

« Cette approche échantillonne au hasard une valeur sur les distributions de probabilités spécifiées et calcule le résultat d'ACV associé. Le calcul est répété un nombre de simulations défini, ce qui conduit à une distribution statistique du résultat. Plus le nombre de simulations est élevé, plus la distribution obtenue se rapprochera de la distribution réelle des résultats. Les approches d'échantillonnage statistique s'appuient sur des distributions de probabilités des données d'entrée. Le choix de la distribution peut se faire de façon « scientifique » à partir de tests. Cependant, le peu de données disponibles amène souvent les praticiens à se baser sur des jugements d'experts ou à effectuer un choix arbitraire. Les paramètres de la distribution statistique (moyenne, écart-type, minimum, maximum, etc.) sont déterminés à partir de mesures expérimentales, de données de littérature, de jugements d'experts ou de façon arbitraire. »

Source : Les différentes sources d'incertitudes en ACV, leurs modes de calcul et impacts sur l'interprétation, juin 2015, ScoreLCA (Etude °2014-03)

C'est le cas dans cette étude, le jugement d'experts sur base de la notation de la qualité des données a été utilisé pour déterminer les distributions statistiques des jeux de données.

Cette incertitude est déterminée à l'aide d'une distribution normale dont les caractéristiques s'appuient sur l'évaluation des données présentées dans le chapitre précédent.

Un facteur d'incertitude est appliqué à chacune des notes relatives à la qualité afin de déterminer le facteur d'incertitude moyen par inventaire de cycle de vie.

Le facteur d'incertitude moyen pour un inventaire est calculé par la formule ci-dessous :

$$\frac{TeR \times Fn + GR \times Fn + TiR \times Fn + C \times Fn + M \times Fn}{TeR + GR + TIR + C + M}$$

Avec :

- (Fn) : facteur d'incertitude et (n) note relative à la qualité (de 1 à 5)
- (TiR) : représentativité temporelle
- (TeR) : représentativité technologique
- (GR) : représentativité géographique
- (C) : complétude
- (M) : pertinence et cohérence méthodologiques

Les facteurs d'incertitudes relatifs à la qualité des données sont présentés ci-dessous. Ces facteurs sont déterminés à dire d'expert.

Tableau 4-4 : Facteurs d'incertitude associés à la qualité des données

Note relative à la qualité des données	Facteur d'incertitude (Fn)
1	1.05
2	1.1
3	1.25
4	1.5
5	2

À noter que la notation de la qualité des données d'inventaire est essentiellement centrée sur les inventaires impliqués dans les étapes de production des MPR, consommation des MPR et production de vierge évité. Un facteur d'incertitude de 1.5 a été appliqué sur les étapes de collecte, tri et collecte évités et un facteur de 1.15 pour la fin de vie évitée.

Une loi de distribution normale est appliquée sur le facteur d'incertitude obtenu pour chaque donnée d'inventaire. Pour un facteur de 1.25, une distribution de plus ou moins 25% (variance) dans un intervalle de confiance de 95% est appliqué.

Pour faire le lien avec le tableau d'évaluation de la qualité des données, la moyenne des facteurs d'incertitudes, pour chacun des critères d'évaluation de la qualité des données, est appliquée dans la modélisation. La distribution statistique est appliquée à la totalité de l'inventaire (pas de différenciation selon le flux élémentaire de l'inventaire³⁰).

4.3.2 Résultats

Les résultats de l'analyse d'incertitude par filière de recyclage sont présentés dans le chapitre 5 *Résultats par filière et par tonne*.

L'incertitude sur les résultats pour les volumes collectés par FEDEREC dépend de l'incertitude par filière et des tonnages associés. En effet, on constate que l'incertitude relative associée à la filière de recyclage du zinc est très élevée tandis que les filières de recyclage contribuant le plus aux résultats totaux sont celles de l'acier et d'aluminium. Ainsi l'incertitude totale des résultats du BNR sur le changement climatique est plus fortement corrélée à l'incertitude de ces deux dernières qu'à celle du zinc par exemple.

³⁰ Pour une évaluation optimale, il faudrait différencier l'incertitude selon le flux élémentaire : les émissions de CO₂ présentent généralement une plus faible incertitude que les flux d'émissions de particules par exemple.

5 Résultats par filière et par tonne

Le logiciel utilisé pour calculer les résultats est RangelCA (voir présentation en *Annexe 4*).

Afin de faciliter la lecture de cette étude, les résultats sont présentés uniquement pour les catégories d'impacts jugées comme les plus pertinentes, les résultats des autres catégories étudiées étant repris dans les annexes. La sélection des catégories les plus pertinentes est présentée dans en *Annexe 2* sur base des critères suivants :

- Indicateurs les plus influents lors de l'analyse des résultats normalisés et pondérés,
- Indicateurs pouvant être exclus en raison de limites méthodologiques³¹,
- Indicateurs redondants en matière d'origine des impacts environnementaux,
- Echelle d'impacts (mondiale, régionale, locale),
- Type de pollution (air, eau, sol, ressources).

Les indicateurs analysés dans le corps du rapport sont :

- Le changement climatique
- L'utilisation de ressources fossiles
- L'utilisation des ressources minérales
- Les émissions de particules
- L'eutrophisation marine
- L'eutrophisation des eaux douces.

Les résultats présentés dans ce chapitre sont exprimés par unité fonctionnelle, c'est-à-dire pour **la collecte, le tri et la transformation d'une tonne de déchets afin de produire des matériaux intermédiaires issus de MPR en substitution de matériaux intermédiaires issus de ressources vierges.**

5.1 Changement climatique, consommation de ressources fossiles et totale

Les résultats des filières de recyclage pour les indicateurs de changement climatique et d'utilisation de ressources fossiles sont présentés dans les deux figures ci-dessous.

Une grande disparité est constatée selon les filières puisque les valeurs moyennes oscillent entre une contribution de 1 kg CO₂-eq non émis/UF pour la filière des inertes à 5 600 kg CO₂-eq non émis/UF pour la filière aluminium. La filière bois émet quant à elle 100 kg CO₂-eq par UF.

L'indicateur d'utilisation des ressources fossiles montre la même disparité avec des résultats moyens oscillants de 4 800 MJ/UF d'énergie fossile consommée par la filière de recyclage du bois à -96 600 MJ/UF pour l'aluminium. La filière papier-carton consomme 6 300 MJ/UF.

Les résultats sur ces deux indicateurs montrent une corrélation élevée, la consommation d'énergie fossile sur le cycle de vie étant fortement liée à la production de gaz à effet de serre et donc à la

³¹ a priori de l'analyse détaillée des résultats présentés ici

contribution au changement climatique. Ceci doit être nuancé en fonction de la proportion d'électricité nucléaire contribuant aux résultats et très faiblement émettrice de gaz à effet de serre.

Il est rappelé que la contribution du carbone biogénique à « l'empreinte carbone d'un produit (ECP) » est nulle (voir 1.1.1).

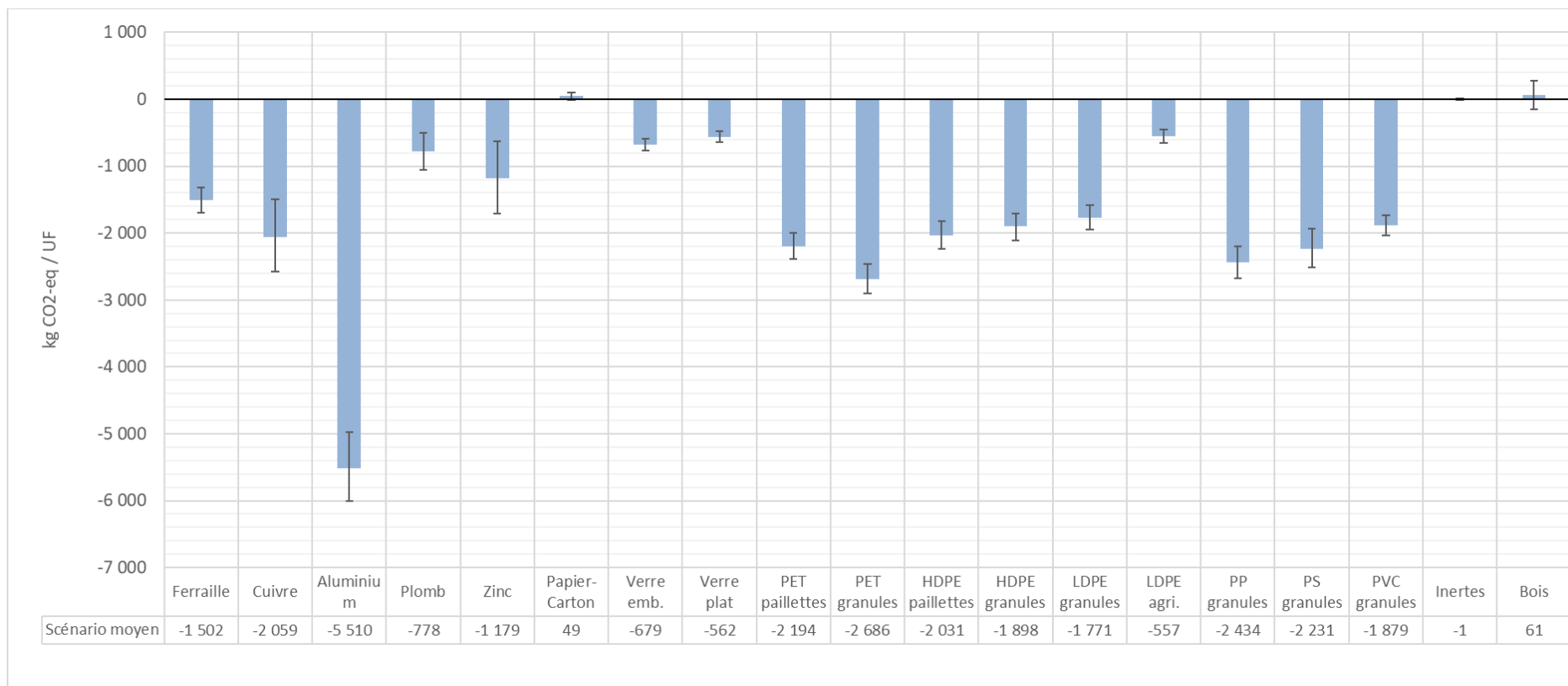
Enfin, l'incertitude présentée sur les graphiques correspond à l'incertitude associée à la qualité des données utilisées. La méthodologie employée est décrite au chapitre précédent (Chapitre 4 - Évaluation de la qualité des données).

La consommation totale de ressources énergétiques est présentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 5-1 : Utilisation de ressources énergétiques totale (en MJ/UF)

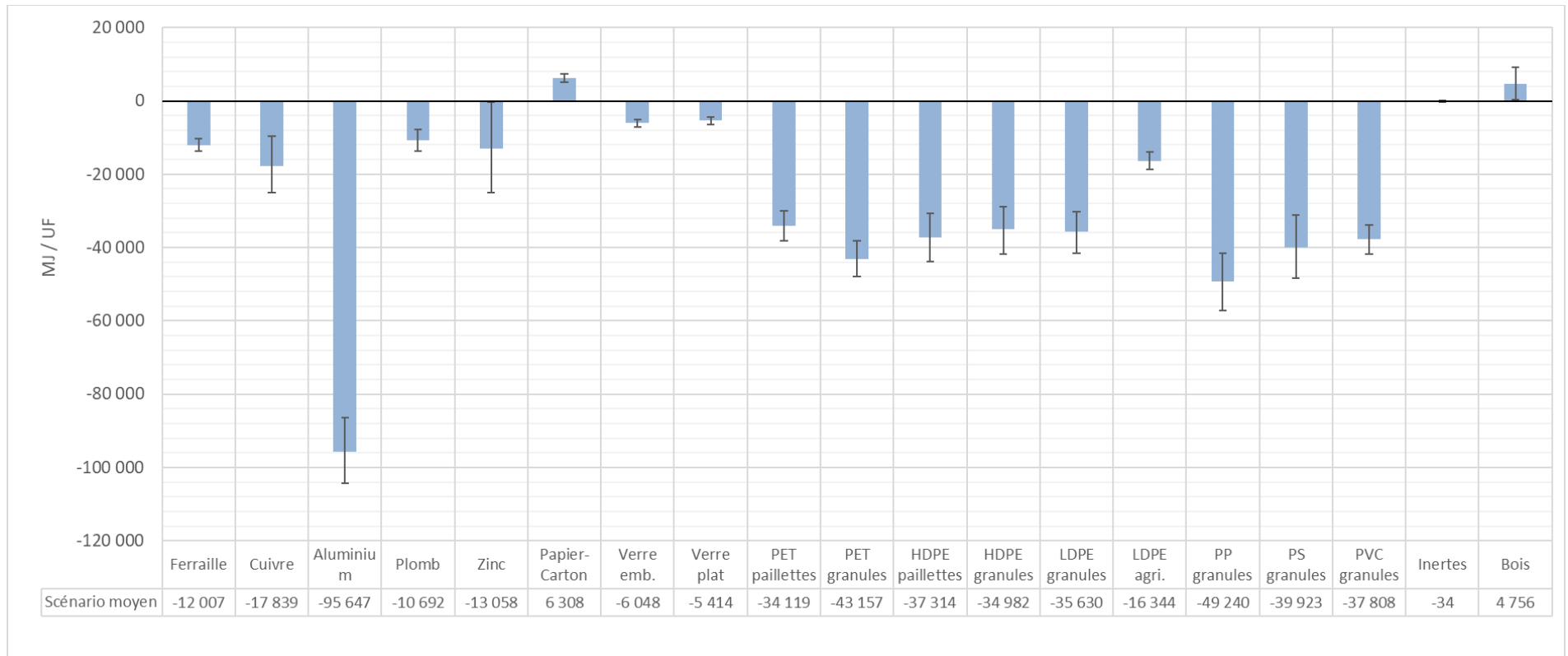
Filière	Ressources énergétiques fossiles	Ressources énergétiques renouvelables	Total
Acier	-12 007	1 109	-10 898
Cuivre	-17 839	-1 625	-19 464
Aluminium	-95 647	-36 149	-131 796
Plomb	-10 692	-2	-10 694
Zinc	-13 058	-2150	-15 208
Papier-carton	6 308	-22 514	-16 205
Verre emballage	-6 048	-585	-6 633
Verre plat	-5 414	-488	-5 902
PET paillettes	-34 119	-653	-34 772
PET granules	-43 157	-757	-43 914
HDPE paillettes	-37 314	-71	-37 385
HDPE granules	-34 982	32	-34 950
PEBD granules	-35 630	-301	-35 930
PEBD agri	-16 344	-164	-16 508
PP	-49 240	112	-49 128
PS	-39 923	324	-39 599
PVC	-37 808	-1 323	-39 132
Inertes	-34	3	-30
Bois	4 756	-7 435	-2 679

Figure 5-1 : Résultats totaux sur le changement climatique



Étant donné la faible probabilité des 5 premiers et derniers percentiles, le calcul de l'incertitude liée à ces résultats est basé sur des lois de distribution normales entre le 5^e et le 95^e percentile. Ceci est vrai pour l'ensembles des incertitudes présentées dans ce chapitre. La procédure de détermination des intervalles de confiance est décrite en chapitre 4.

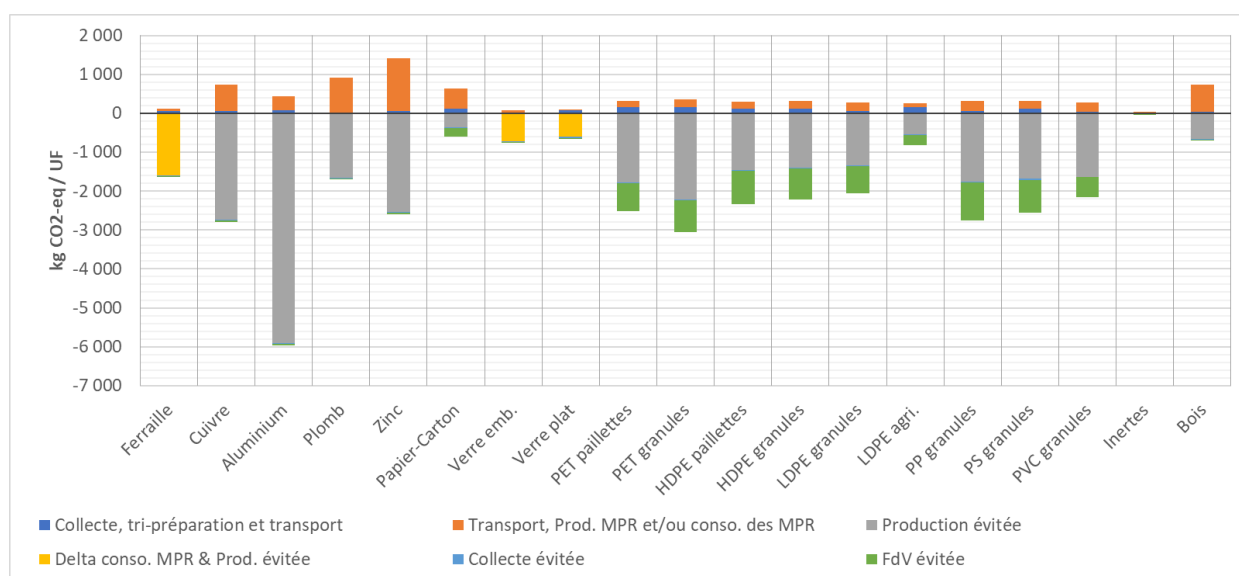
Figure 5-2 : Résultats totaux pour l'utilisation de ressources fossiles



Au sein de chaque filière de recyclage, les impacts générés par les différentes étapes de recyclage permettent d'éviter une production d'un matériau d'origine vierge équivalent³² ainsi qu'un traitement final vers un centre de stockage. Les résultats détaillés par étape de cycle de vie sont présentés dans les *Figure 5-3* et *Figure 5-4*. En chapitre *Error! Reference source not found.*, les résultats sont présentés pour un évitement d'un traitement final intégralement vers (i) l'incinération avec valorisation énergétique et (ii) le stockage en centre d'enfouissement pour les déchets combustibles (plastiques, papier-carton, bois). Ce choix de modélisation exerce une influence forte sur les résultats de ces filières :

- Plastiques : plus le taux d'incinération (évitée) est élevé plus la filière de recyclage présente des bénéfices environnementaux (la combustion de plastiques est émettrice de CO₂).
- PCR et Bois : Le stockage de ces matériaux biosourcés en centre d'enfouissement implique une **dégradation** en conditions anaérobies et par conséquent l'émission de méthane. Le méthane n'est que partiellement capté par les unités de stockage de déchets et la partie émise dans l'air a un pouvoir de réchauffement global bien plus élevé que le CO₂ capté lors de la pousse des arbres. Ainsi, plus le taux d'enfouissement (évitée) est élevé plus la filière de recyclage présente des bénéfices environnementaux.

Figure 5-3 : Résultats par phase sur le changement climatique



Les deux étapes de cycle de vie les plus contributrices aux résultats sont :

- La production de vierge évitée,
- La dernière étape de la filière de recyclage (appelée consommation de MPR ou production de MPR selon la filière)

La fin de vie évitée exerce une influence élevée sur les filières de recyclage du papier-carton et du bois. En effet, la dégradation anaérobie de la proportion de ces matériaux en centre de stockage conduit à une émission de méthane qui n'est pas totalement captée (cf. chapitre 3.9.2.3 pour les hypothèses de modélisation associées à ces émissions). Les résultats dépendent donc de paramètres qui présentent une forte incertitude, comme le taux de dégradation du déchet à 100 ans, le taux de captation du biogaz généré et la valorisation qui en est faite.

³² Niveau de transformation industriel équivalent, c'est-à-dire pouvant entrer à nouveau dans la production de produits semi-finis ou finis. Un coefficient de substitution est pris en compte lorsque la qualité de matériau recyclé n'est pas égale au matériau vierge (par exemple, dans le cas du carton, la fibre est raccourcie, il faut donc généralement utiliser un peu plus de matière pour production d'une boîte carton ayant la même résistance).

L'étape de collecte, tri-préparation et transport exerce une influence variable sur les filières de recyclage (mais plutôt faible pour la plupart). Les inventaires du SRP ne sont pas associés à une interprétation des résultats et, habituellement, le SRP ne donne pas ce découpage (données agrégées). Ainsi, il est difficile de comprendre pourquoi les étapes de collecte, tri-préparation et transport exercent parfois une influence forte et parfois pas. Cependant, vu la faible influence de cette étape sur les filières de recyclage de PS, PP et PVC, on peut supposer qu'elles sont représentatives des flux des industriels et pas de flux multi-matériaux (VHU et DEEE par exemple).

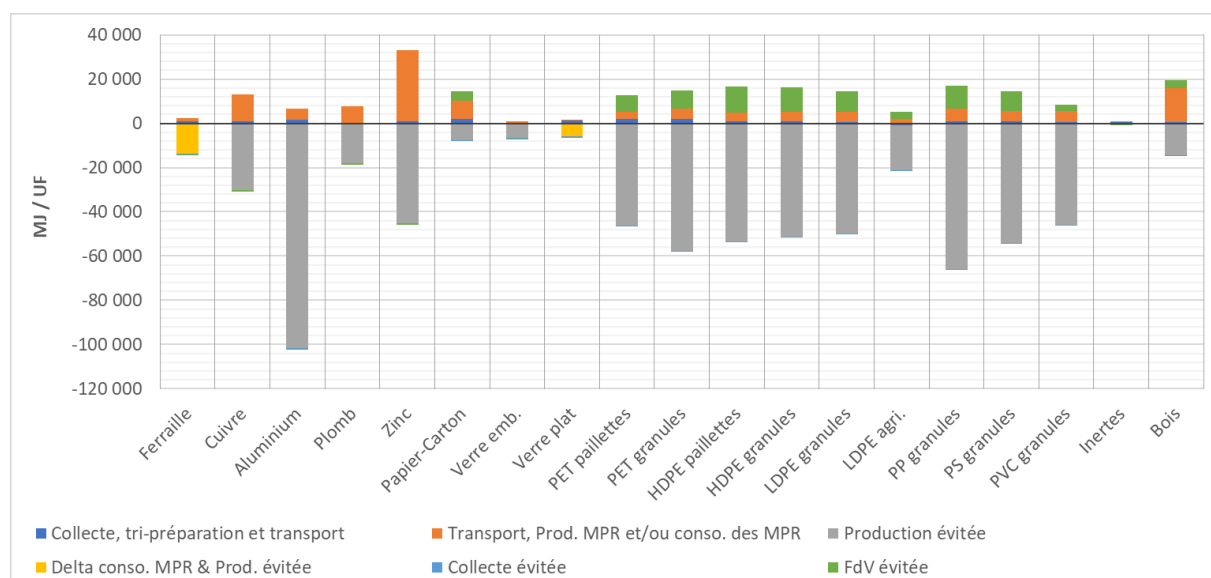
A propos des étapes de tri et préparation des MPR, il est particulièrement important de garder en tête l'unité fonctionnelle de cette étude : la tonne de déchets collectée. Les résultats sont donc fortement dépendants de la pureté du flux de déchets collecté. Ceci s'illustre par exemple dans le cas des déchets de cuivre, flux habituellement pur mais qui dans le cas de FEDEREC est constitué de 33% de câbles, eux-mêmes composés à hauteur de 59% de gaines en plastique. Pour 1 kg de déchets en cuivre collecté, nous considérons donc environ 0.8 kg de cuivre recyclé.

Dans le cas des **inertes du BTP**, les résultats sont proches de 0. Les impacts des étapes de recyclage dépendent des hypothèses de taux d'indésirables et de pertes associées au flux à recycler (des hypothèses ont été posées sur ce paramètre). Avec les hypothèses prises, les impacts du recyclage sont légèrement plus élevés que ceux du vierge cependant l'évitement d'un traitement final en centre de stockage permet de faire basculer le résultat moyen en faveur du recyclage.

Dans le cas du **papier-carton**, les résultats diffèrent selon le type de recyclage (papier graphique ou carton), le type de matière première vierge et le type de fin de vie évitée.

A noter que, dans le cas des filières de recyclage des ferrailles, du verre plat et du verre emballage, les inventaires c'est directement la différence entre les impacts environnementaux de l'incorporation de MPR et les impacts environnementaux de la production vierge évitée qui sont présentés dans les graphiques de résultats.

Figure 5-4 : Résultats par phase sur l'utilisation de ressources fossile



Pour l'indicateur d'utilisation des ressources fossiles, ce sont les étapes de production évitée puis de production et consommation des MPR qui sont prépondérantes. On fait le même constat que sur l'indicateur de changement climatique sur les filières de recyclage des plastiques : l'étape de collecte, tri-préparation et transport exerce une influence variable selon la matière recyclée.

Pour les filières papier-carton et bois, on constate que la consommation de ressources fossiles est légèrement plus élevée pour la filière de recyclage que la filière de vierge. Ceci explique donc les contributions positives aux deux indicateurs présentés dans ce chapitre. En revanche, l'analyse de la

consommation de ressources énergétiques totales en Tableau 5-1 démontre que ces filières sont bien responsables de l'évitement de consommation énergétique lorsque les énergies renouvelables sont prises en considération.

5.2 Utilisation des ressources minérales

Les résultats pour l'indicateur d'utilisation des ressources minérales sont présentés dans les Figure 5-5 et Figure 5-6.

On constate trois ordres de grandeur selon la filière de recyclage : les filière cuivre, zinc et plomb avec des résultats de l'ordre de -10^0 à -10^{-1} kg Sb-eq puis la filière ferraille et aluminium avec des résultats de l'ordre de -10^{-2} et enfin les autres filières de recyclage non métalliques.

Les résultats de cet indicateur sont très sensibles à la présence de cuivre, de zinc et, dans une plus faible mesure, d'acier et de plomb dans le cycle de vie. Ainsi, en recherchant l'origine des contributions pour les filières de recyclage présentant le plus faible ordre de grandeur³³, on constate que ce sont les infrastructures et bâtiments des usines qui contribuent le plus aux résultats³⁴. Ces derniers sont généralement implémentés de manière très grossière dans les inventaires de cycle de vie et présentent donc une incertitude très élevée. Par ailleurs, il n'a pas été possible de déterminer si les bâtiments et infrastructures sont implémentés dans les inventaires du cuivre et du plomb (cf. Annexe 3).

- Dans le cas du cuivre, cela n'a pas grande importance car c'est la consommation de la ressource qui domine les enjeux environnementaux sur cet indicateur.
- Dans le cas du plomb, les inventaires pour le recyclé et pour le vierge sont issus de la même source donc la comparaison reste cohérente.

³³ Ceci est possible avec les inventaires de cycle de vie Ecoinvent qui sont désagrégables.

³⁴ Les infrastructures et bâtiments sont également appelés « immobilisations » dans les bilans carbone.

Figure 5-5 : Résultats totaux pour l'indicateur d'utilisation des ressources minérales

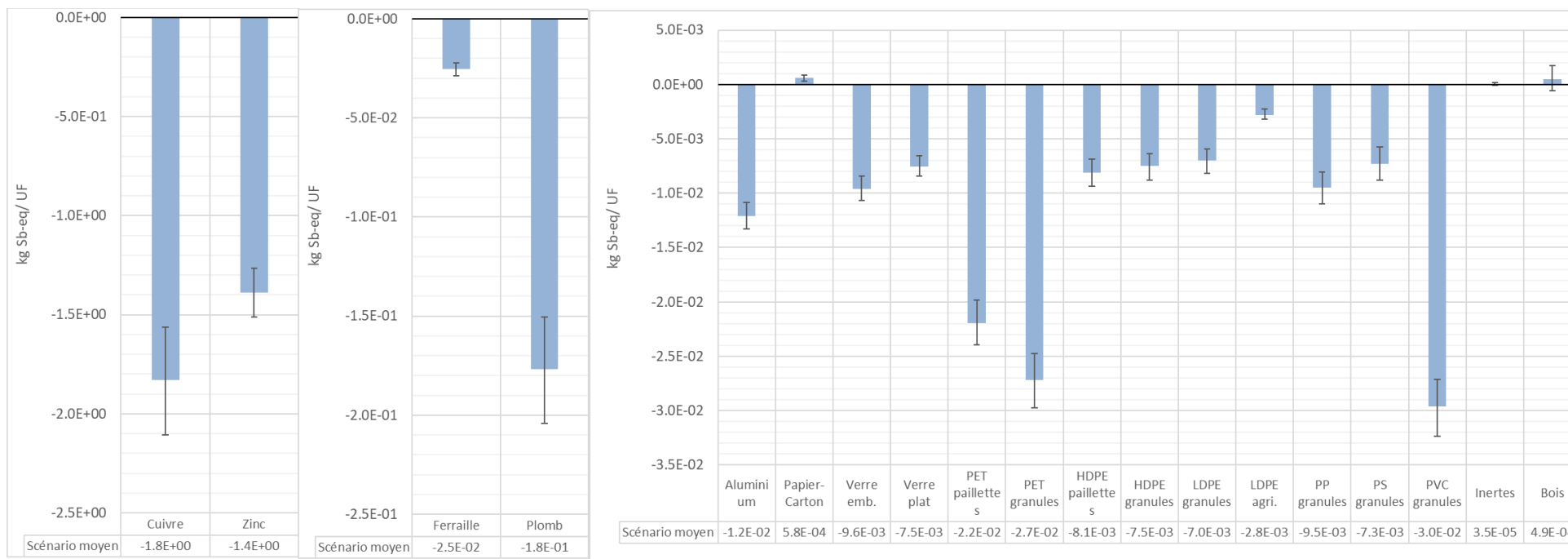
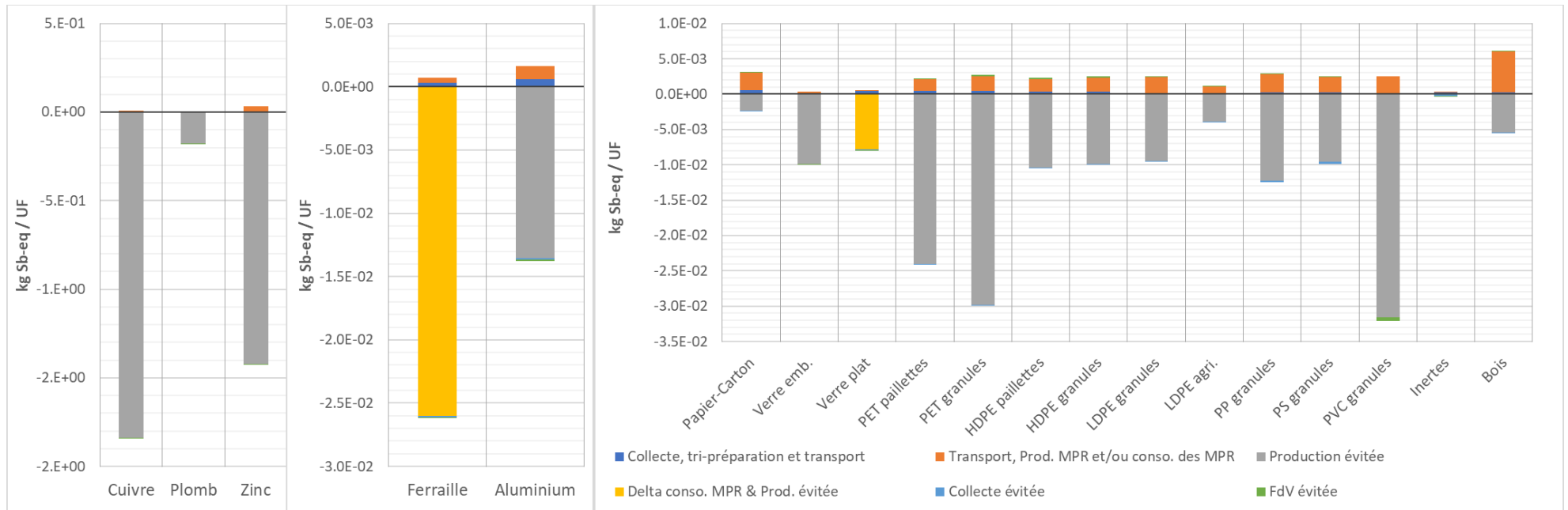


Figure 5-6 : Résultats par phase pour l'utilisation des ressources minérales



5.3 Émissions de particules

Les résultats pour l'indicateur d'émissions de particules sont présentés dans les **Error! Reference source not found.** et **Error! Reference source not found.**

L'ordre de grandeur pour les filières de recyclage des métaux non ferreux est plus élevé que pour les autres filières.

Par ailleurs, l'indicateur d'émissions de particules est très sensible :

- au lieu d'émission : zone rurale, zone urbaine, émissions via des hautes cheminées ou proche du sol, etc.
- au type de particules émises : à l'origine, la méthode ne prend en compte que les émissions de PM2.5. Cependant, le JRC a constaté que les émissions de particules n'étaient pas implémentées précisément dans les inventaires de cycle vie. Ainsi, il a décidé d'attribuer un facteur de caractérisation au PM10 à hauteur de 23% de celui des PM2.5 ;³⁵
- au compartiment d'émissions non spécifié : lorsque le lieu d'émissions n'est pas précisément connu, il est possible d'indiquer la valeur en « *unspecified* ». Le JRC³⁵ a décidé d'appliquer un principe de précaution et de considérer le facteur de caractérisation le plus élevé lorsque le lieu d'émission n'est pas spécifié (en pratique, cela revient à considérer que les particules sont émises près du sol en zone urbaine).

Cette sensibilité de l'indicateur d'émissions de particules aux choix ou à la précision de la modélisation rend les résultats peu fiables lorsque les principales étapes de cycle de vie sont modélisées à l'aide de bases de données multiples. C'est le cas par exemple de la filière de recyclage du cuivre. La production de vierge est issue de CopperAlliance alors que la fusion et l'affinage des matières premières de recyclage est issue de Ecoinvent.

Pour les autres filières, la production de vierge a une contribution plus élevée que les étapes de recyclage, sauf pour le plomb. Vu que les inventaires du plomb d'origine vierge et du plomb issu du recyclage dépendent de la zone géographique dans laquelle les étapes sont effectuées, on peut supposer qu'une part de la différence entre les deux filières est liée à l'emplacement des usines et donc au mix électrique associé. Cependant, il n'est pas possible de le vérifier étant donné que les inventaires sont agrégés.

Remarque : pour les étapes de tri, préparation des matériaux et de broyage, une estimation des émissions directes (et diffuses) a été appliquée comme indiqué dans le Tableau 3-6. Les résultats n'ont cependant pas montré de sensibilité significative sur les filières concernées.

³⁵ Fazio, S. Castellani, V. Sala, S., Schau, EM. Secchi, M. Zampori, L., Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods, EUR 28888 EN, European Commission, Ispra, 2018, ISBN 978-92-79-76742-5, doi:10.2760/671368, JRC109369.

Figure 5-7 : Résultats totaux pour l'indicateur d'émissions de particules

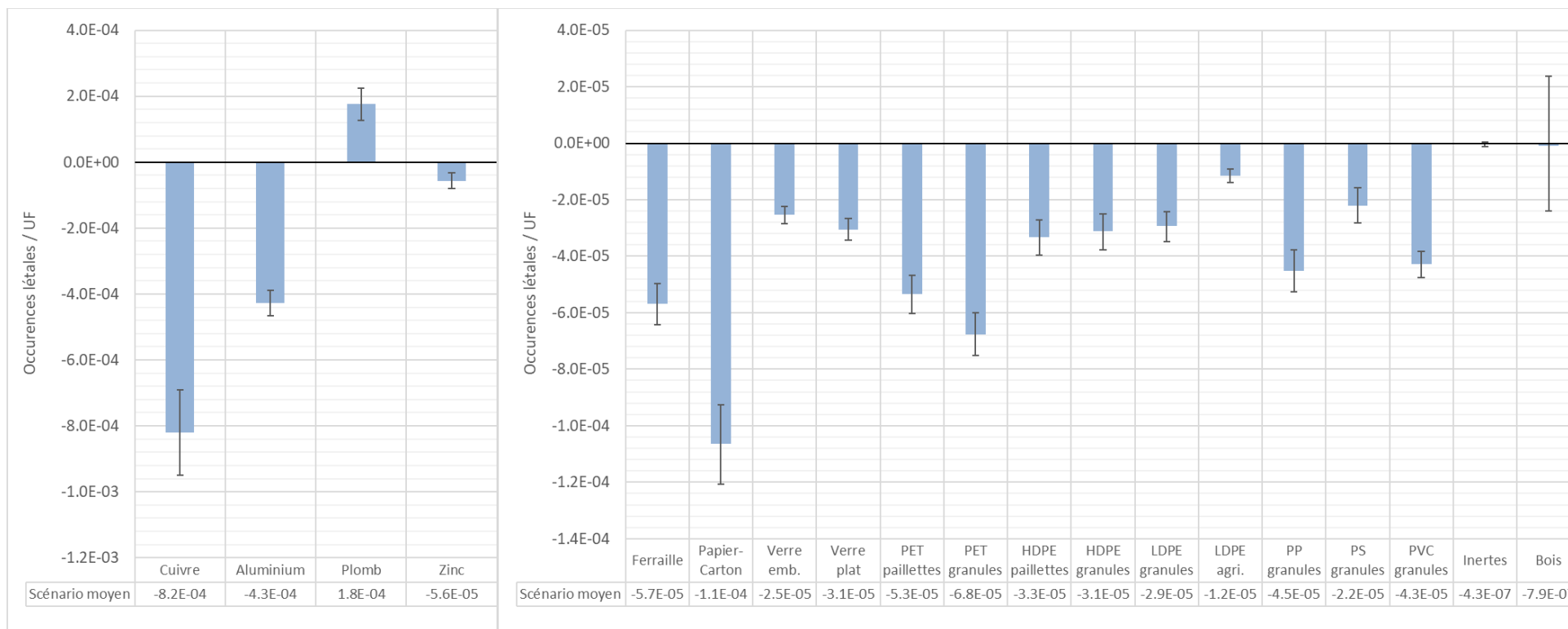
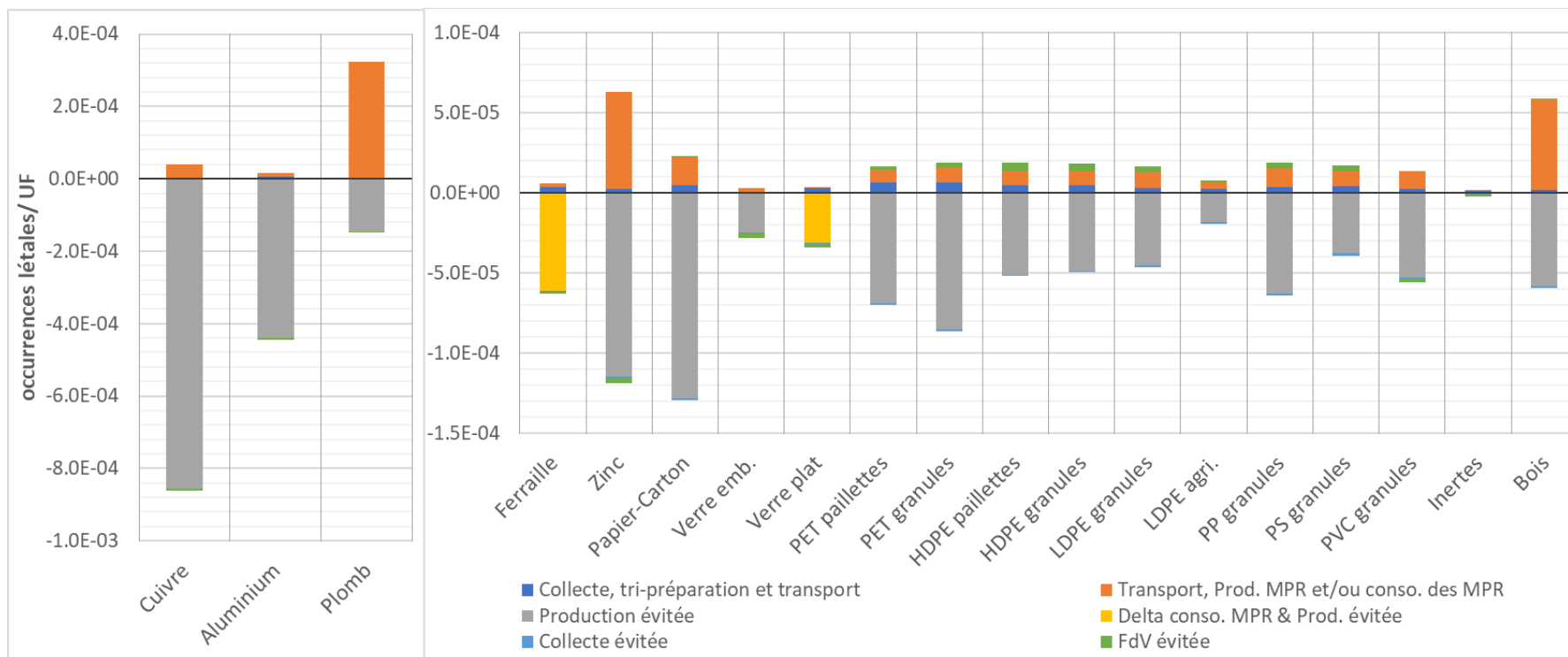


Figure 5-8 : Résultats par phase pour l'indicateur d'émissions de particules



5.4 Eutrophisation des eaux marines et des eaux douces

Les résultats totaux et par phase pour l'eutrophisation des eaux marines sont présentés dans les **Error! Reference source not found.** et **Error! Reference source not found.**

Les résultats de ces deux indicateurs sont très sensibles au mix énergétique et aux émissions directes d'azote et phosphate de certains procédés.

Les phases de production de vierge évité et de production et/ou de consommation de MPR sont les principales contributrices. Pour la majorité des filières, les résultats oscillent entre 0 et 5 kg d'azote non émis / UF.

Dans le cas de l'eutrophisation des eaux douces, c'est la présence de charbon dans le cycle de vie qui est généralement le principal contributeur. Cet indicateur présente donc une sensibilité forte à la zone géographique couverte par l'inventaire et donc au mix électrique dépendant de la répartition des tonnages vendus selon la destination.

À noter que les hypothèses posées concernant le champs géographique, considérées en chapitre 2.10, présentent une grande influence sur les résultats de cet indicateur d'eutrophisation. En effet, les inventaires construits sur un périmètre français avec un mix électrique très faiblement charbonné sont moins émissifs en phosphates (émissions à long terme liées au stockage des remblais de l'extraction minière³⁶) que les inventaires construits sur un périmètre européen (le mix électrique européen contient environ 16% d'électricité produite à partir de centrales à charbon).

Pour le cas des inventaires issus d'autres sources et bases de données que Ecoinvent comme le cuivre (CopperAlliance), le plomb (ILA) ou encore l'acier (Worldsteel), les flux d'émissions à long terme de phosphate sont inexistantes. **Le mélange de bases de données présente donc un manque de cohérence sur l'indicateur d'eutrophisation des eaux douces.** C'est particulièrement marqué avec le cuivre puisque les étapes d'affinage et d'électrolyse de matières premières de recyclage sont modélisées à l'aide de l'inventaire d'Ecoinvent tandis que la production de vierge utilise l'inventaire de CopperAlliance.

³⁶ 17 kg de remblai par kilogramme de charbon sont extraits de la mine

Figure 5-9 : Résultats totaux sur l'eutrophisation des eaux marines

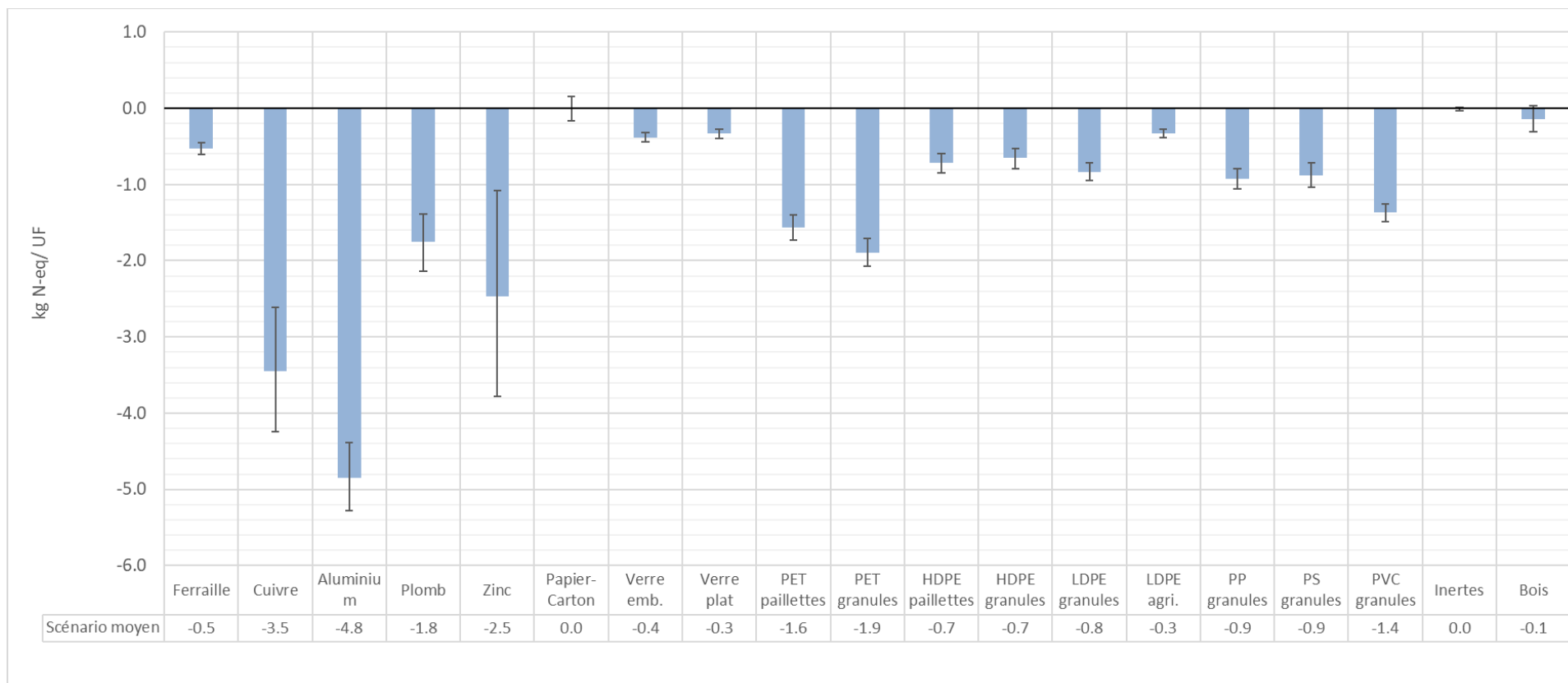


Figure 5-10 : Résultats par phase pour l'eutrophisation des eaux marines

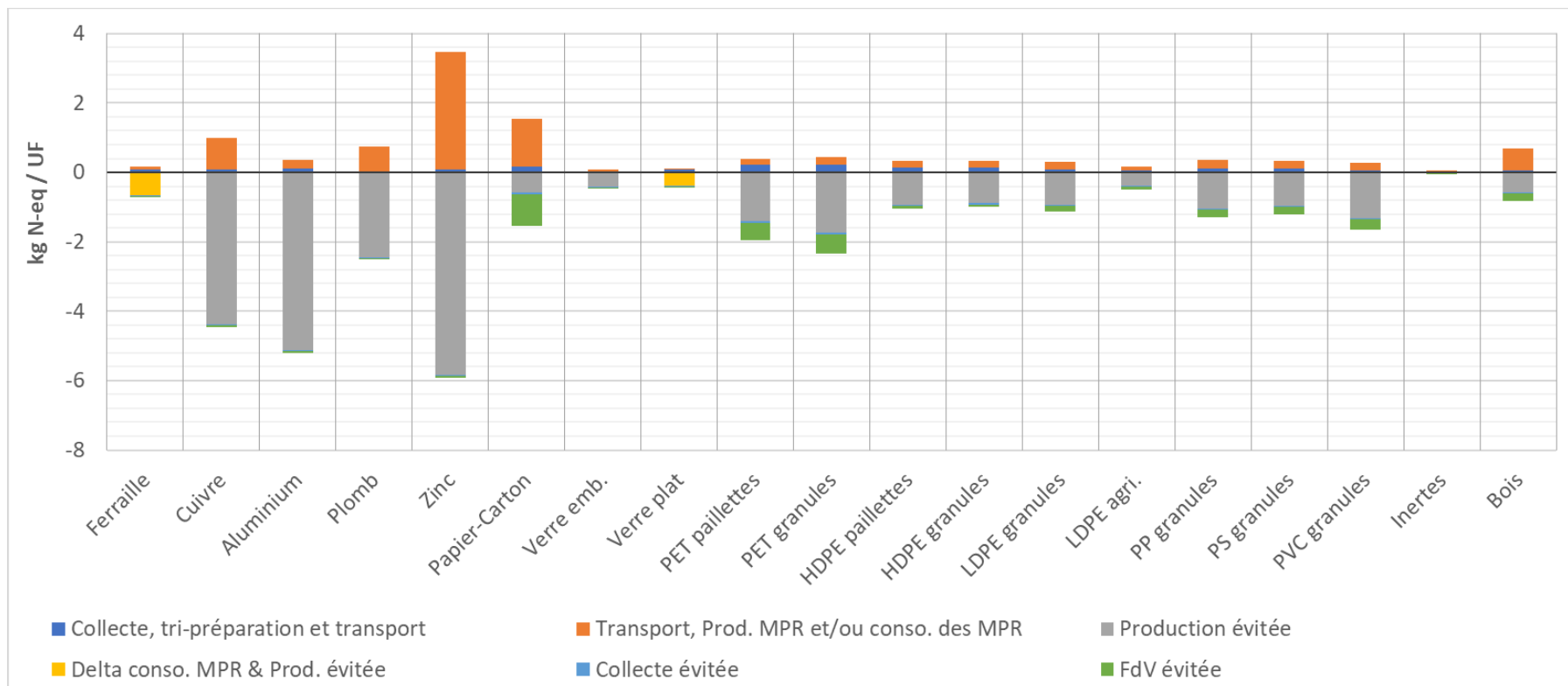


Figure 5-11 : Résultats totaux sur l'eutrophisation des eaux douces

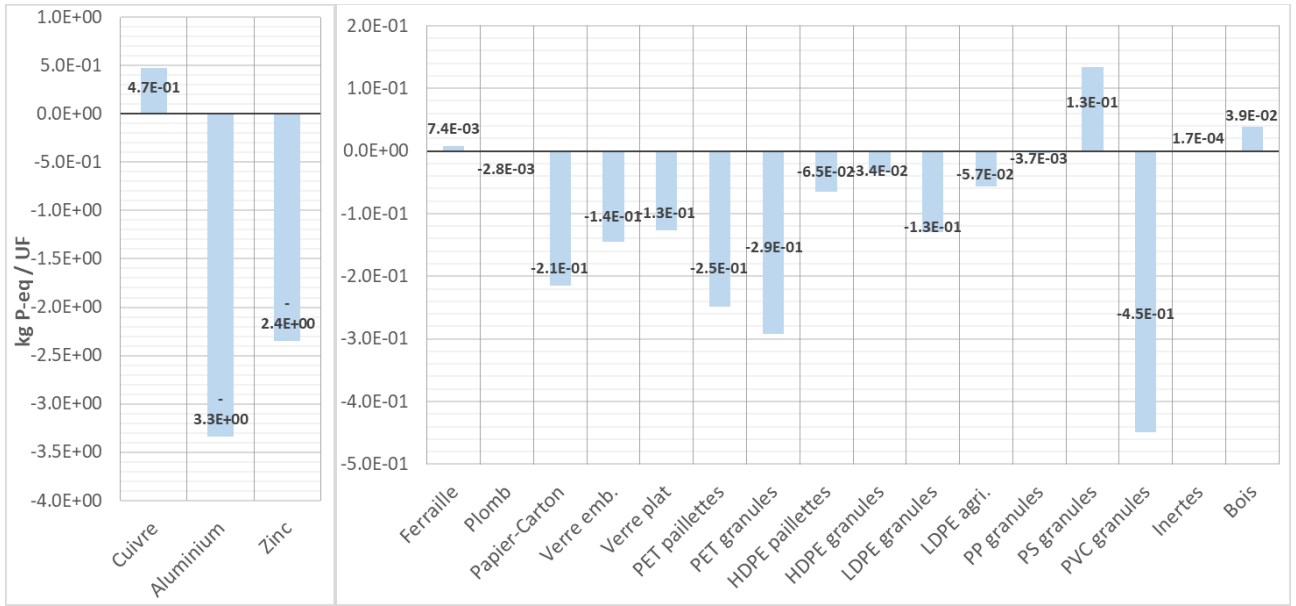
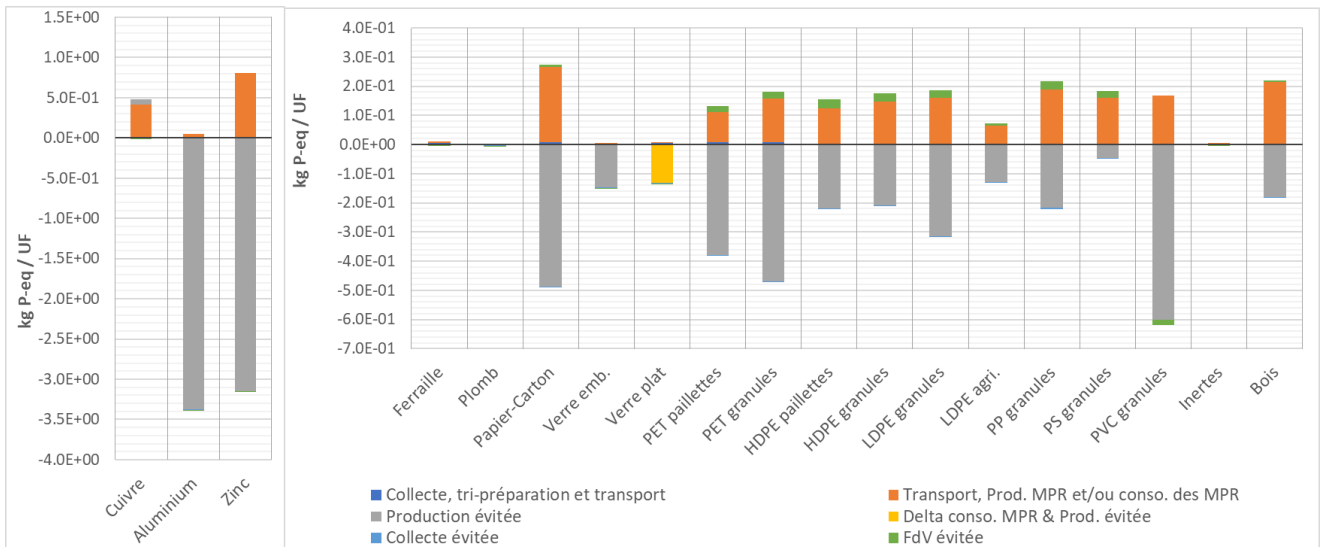


Figure 5-12 : Résultats par phase sur l'eutrophisation des eaux douces



6 Résultats pour les tonnages collectés par FEDEREC en 2021

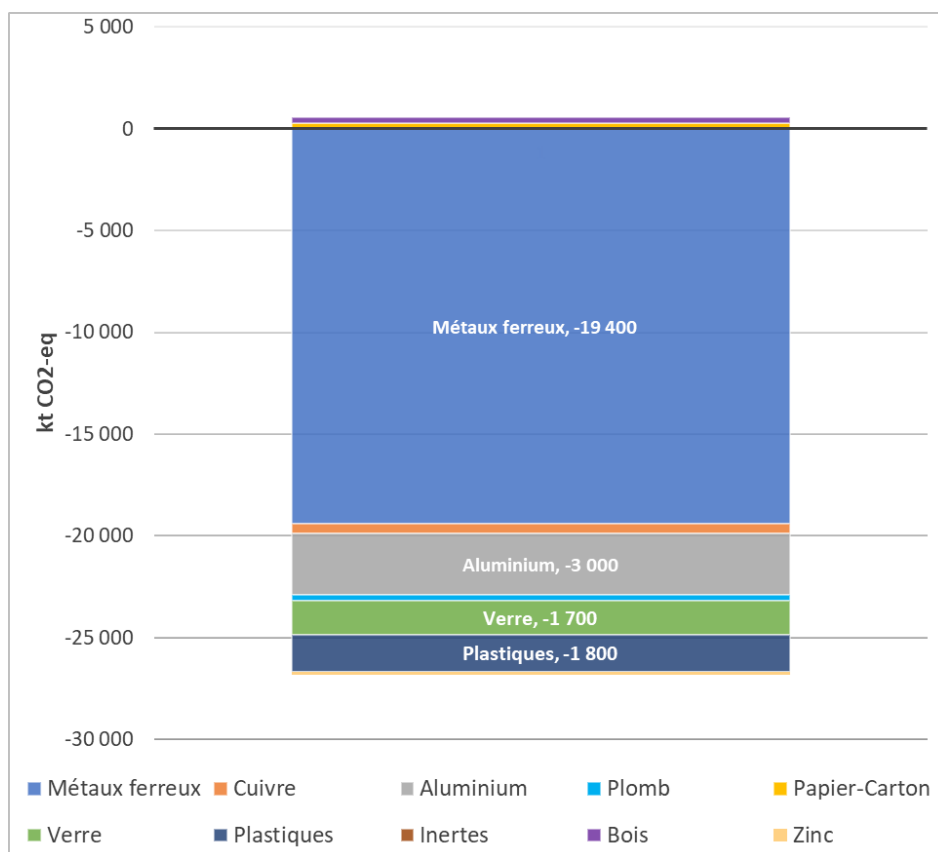
Les tonnages collectés par FEDEREC et ses adhérents sont rappelés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6-1 : Tonnages collectés et utilisés pour les résultats environnementaux

Filière de recyclage	Tonnage collecté
Métaux ferreux	12 900 kt
Aluminium	551 kt
Cuivre	245 kt
Plomb	347 kt
Zinc	143 kt
Papier-carton	6 874 kt
Verre	2 518 kt
Plastiques	906 kt
Inertes du BTP	11 500 kt
Bois	7 157 kt
Total	43 141 kt

En 2021, les principales filières couvertes par cette mise à jour ont permis d'éviter l'émissions de l'ordre de 26 480 kt de CO2eq pour 43 141 kt de déchets collectés sur le territoire français.

Figure 6-1 : Contribution des filières à la catégorie d'impact changement climatique – FEDEREC 2021



Le recyclage des métaux ferreux représente 74% de la contribution totale au changement climatique, avec 19 400 kt CO₂eq non émises pour 12 900 kt de ferrailles collectées en 2021.

Le recyclage de l'aluminium contribue à hauteur de 11% de la contribution totale, avec 3 000 kt de CO₂eq non émises pour 551 kt de déchets collectés.

Le recyclage des plastiques contribue à hauteur de 7% de la contribution totale, avec 1 800 kt de CO₂eq non émises pour 906 kt de déchets collectés.

Le recyclage du verre contribue à hauteur de 6% de la contribution totale, avec 1 700 kt de CO₂eq non émises pour 2 518 kt de déchets collectés.

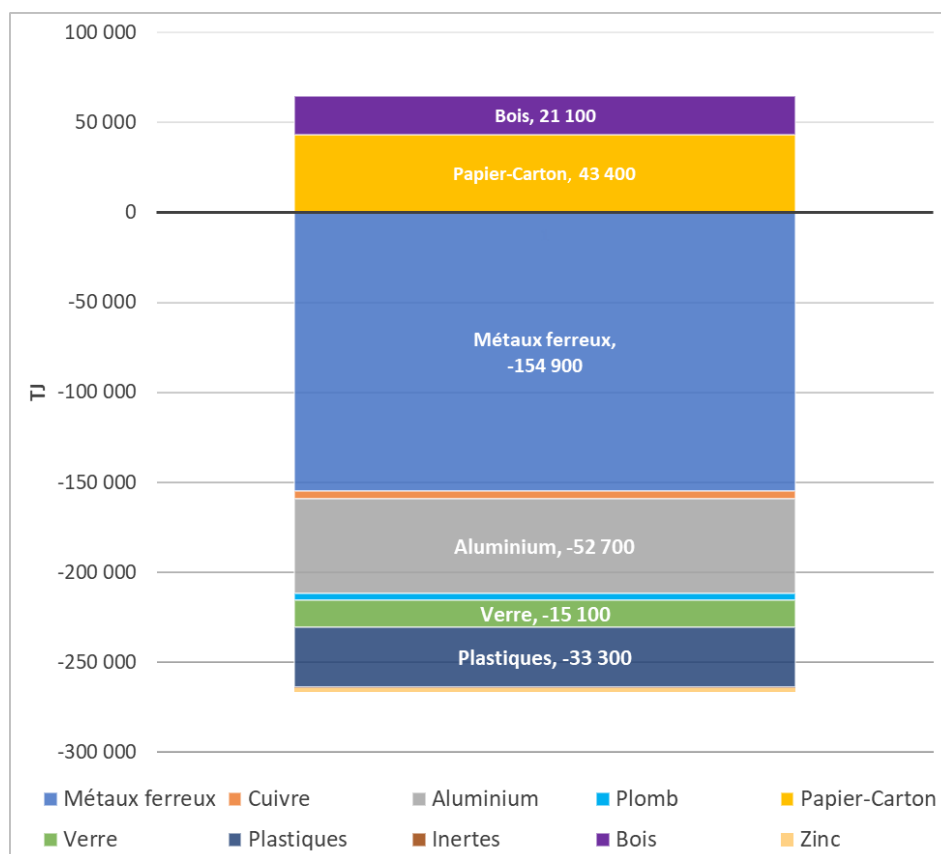
Les autres filières contribuent pour 3% du total.

A noter qu'il est considéré un recyclage des plastiques de haute qualité, c'est-à-dire substituant la production de plastique d'origine vierge du même type de résine pour la fabrication de nouveaux produits ou emballages en plastique. Cependant, une partie du plastique recyclé peut être incorporé dans d'autres produits, par exemple du mobilier urbain. Dans ce type de recyclage, le matériau substitué n'est pas forcément la même résine que celle recyclée, voire peut être un mix de matériaux différents (comme le béton, le bois et l'acier pour les banc publics – cf. analyse de sensibilité au chapitre 7.4).

Enfin, le mix de traitement de fin de vie évité pris en compte dans les calculs est dépendant de l'origine des déchets. Les émissions de méthane liées à la dégradation anaérobie du papier-carton et du bois ont à ce titre une influence forte sur les résultats. L'analyse de sensibilité présentée au chapitre 7.1 explicite cette nécessité d'interpréter les résultats avec prudence pour les flux de déchets concernés (papier-carton, plastiques et bois).

En 2021, les principales filières de recyclage couvertes par FEDEREC et ses adhérents ont permis de ne pas consommer de l'ordre de **201 800 TJ d'énergie fossile** (Figure 6-2).

Figure 6-2 : Contribution des filières de recyclage à l'utilisation de ressources fossiles – FEDEREC 2021



Le recyclage des métaux ferreux représente 47% de la contribution totale, l'aluminium 16%, les papiers-cartons 13% et les plastiques 10%.

Pour la filière papier-carton, selon les inventaires de cycle de vie utilisés (et en particulier les inventaires issus des données de FEFCO), les impacts de la filière de recyclage sont supérieurs à ceux de la filière de production de matière vierge. Ceci s'explique par la prise en compte des seules consommations primaires d'énergie fossile : l'analyse de l'inventaire de production de carton vierge (kraftliner adapté pour approcher le 100% vierge) demande effectivement 36,5 MJ d'énergie renouvelable primaire (principalement issue de la biomasse) et 16 MJ d'énergie primaire fossile contre respectivement 1,3 MJ et 9,5 MJ pour l'inventaire de production de carton recyclé. C'est donc par la prise en compte des étapes nécessaires de collecte, tri, transport des déchets de papier carton ainsi que le taux de substitution au matériau vierge qui produisent des résultats positifs pour la filière de recyclage papier-carton pour cet indicateur.

La filière bois est également concernée par le type d'énergie (pétrosourcé et biosourcé). L'influence de la part d'énergie biosourcée dans l'énergie totale nécessaire à l'étape de séchage des copeaux de bois est évaluée en analyse de sensibilité au chapitre 7.5.

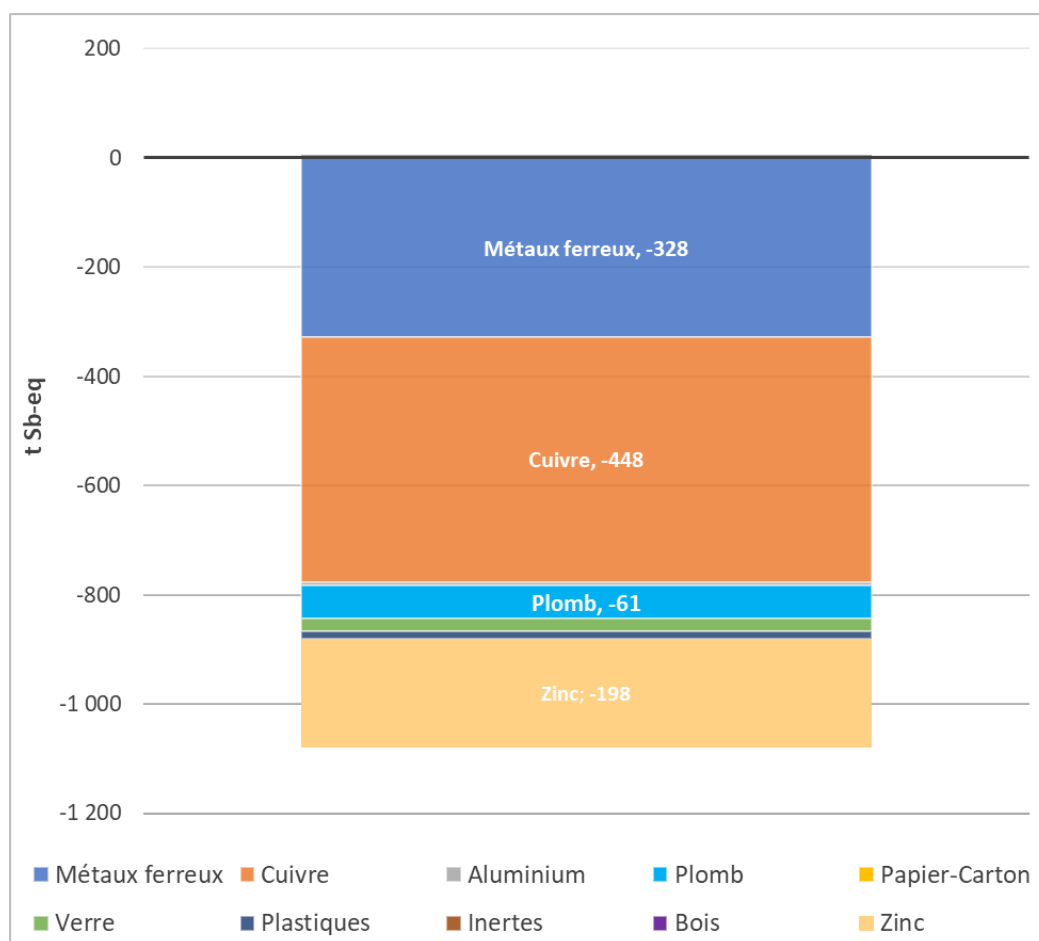
Tableau 6-2 : Résultats pour l'utilisation de ressources énergétiques totale pour les tonnages collectés par FEDEREC en 2021 (en TJ)

Filière	Ressources énergétiques fossiles	Ressources énergétiques renouvelables	Total
Acier	-154 892	14 305	-140 587
Cuivre	-4 367	-398	-4 765
Aluminium	-52 682	-19 911	-72 593
Plomb	-3 708	-1	-3 709
Zinc	-1 865	-307	-2 172
Papier-carton	43 364	-154 759	-111 395
Verre emballage	-13 777	-1 333	-15 109
Verre plat	-1 299	-117	-1 417
PET paillettes	-4 133	-79	-4 212
PET granules	-5 228	-92	-5 320
HDPE paillettes	-2 505	-5	-2 510
HDPE granules	-2 349	2	-2 346
PEBD granules	-4 168	-35	-4 203
PEBD agri	-1 912	-19	-1 931
PP	-7 433	17	-7 416
PS	-1 249	10	-1 238
PVC	-4 288	-150	-4 438
Inertes	-391	39	-351
Bois	21 104	-32 991	-11 887
Total FEDEREC 2021	-201 776	-195 822	-397 598

Pour l'indicateur d'utilisation des ressources minérales (Figure 6-3) les filières de recyclage couvertes par FEDEREC ont permis de ne pas utiliser ces ressources à hauteur de 1 070 t Sb-eq en 2021.

Ainsi, les filières les plus contributives aux résultats de cet indicateurs sont les métaux à hauteur de 96% dans les proportions suivants : (i) cuivre (41%), (ii) ferrailles (31%), (iii) zinc (18%), (iv) le plomb (6%) et (v) l'aluminium (1%). Dans le chapitre 5.2, il a été montré que les autres filières présentaient de fortes incertitudes puisque les résultats sont fortement liés aux bâtiments et infrastructures (généralement modélisés grossièrement en ACV). Les résultats étant très négligeables, ces filières ne viennent pas augmenter l'incertitude autour de cet indicateur.

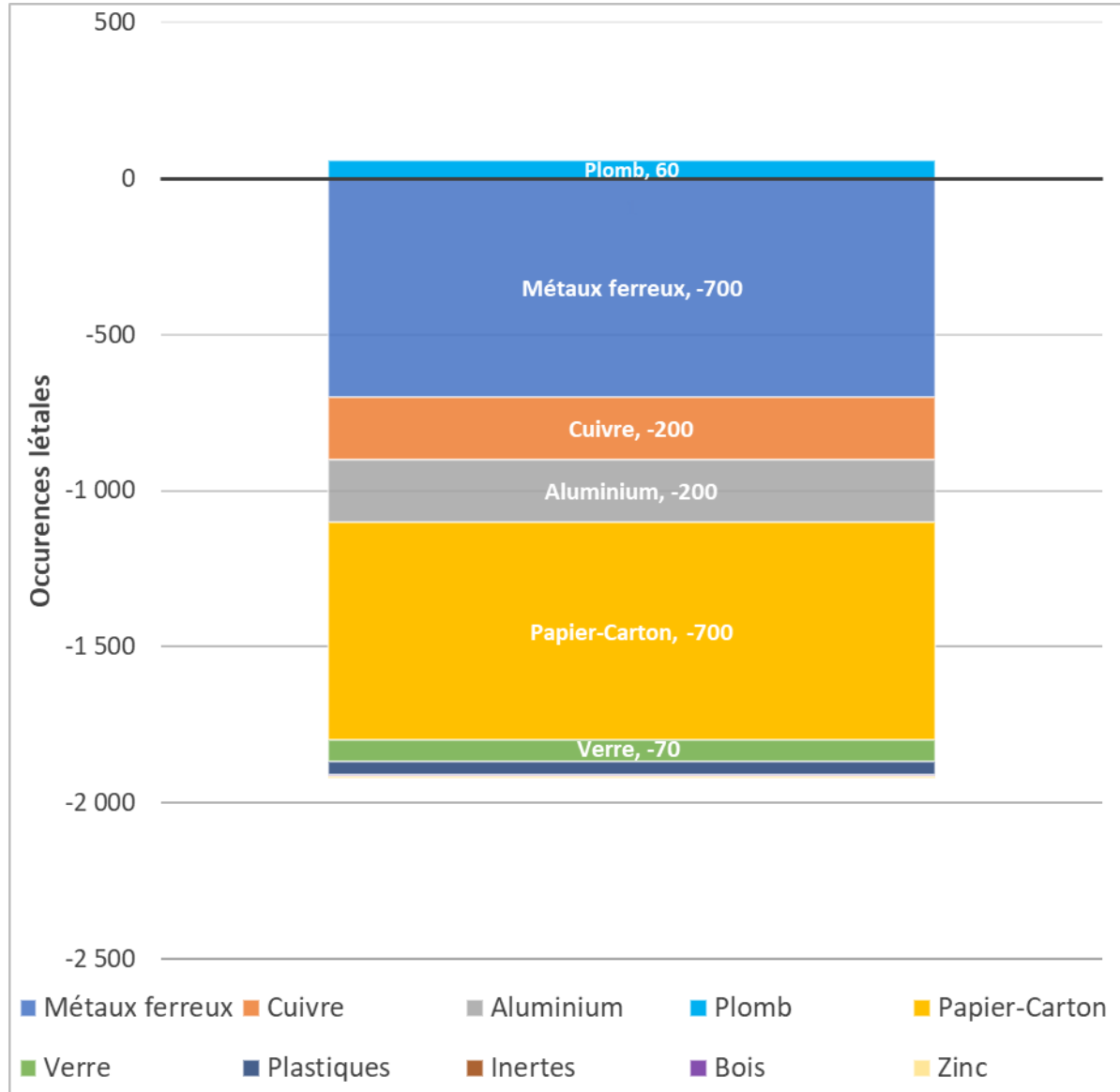
Figure 6-3 : Contribution des filières de recyclage à l'utilisation des ressources minérales – FEDEREC 2021



Pour l'indicateur de **particules**, les filières de recyclage couvertes par FEDEREC ont permis de ne pas émettre des particules potentiellement responsables du décès de 1 960 personnes en 2021.

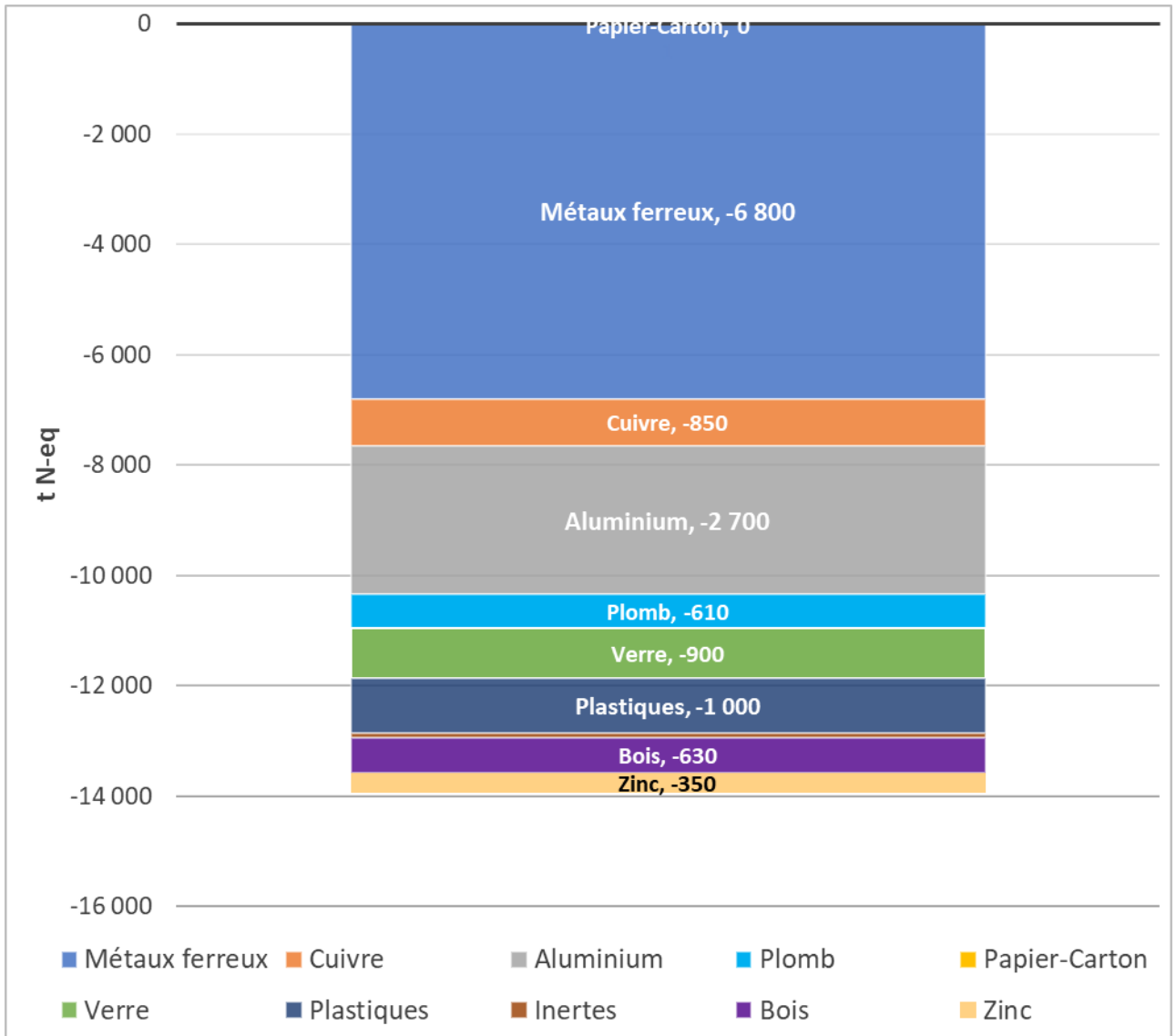
Les principales filières représentées sont le papier carton avec 38%, les métaux ferreux avec 37% de la contribution au résultat total, l'aluminium avec 11%, et le cuivre avec 11%.

Figure 6-4 : Contribution des filières de recyclage aux émissions de particules – FEDEREC 2021



Pour l'indicateur d'**eutrophisation marine**, les filières de recyclage de FEDEREC ont permis de ne pas émettre **13 970 t N-eq** en 2021.

Figure 6-5 : Contribution des filières de recyclage à l'eutrophisation marine – FEDEREC 2021



7 Analyses de sensibilité

7.1 Influence de la fin de vie évitée sur les résultats

Dans les chapitres 5 et 6, nous avons présenté les résultats pour un scénario de fin de vie évitée incluant la mise en décharge et l'incinération dans les proportions discutées en 3.9.2.

Cette analyse de sensibilité a pour objectif de mettre en lumière l'influence que ces deux types de traitement peuvent avoir sur les résultats, ce sont donc les scénarios de fin de vie évitée 100% incinération et 100% stockage qui vont être comparés ci-dessous.

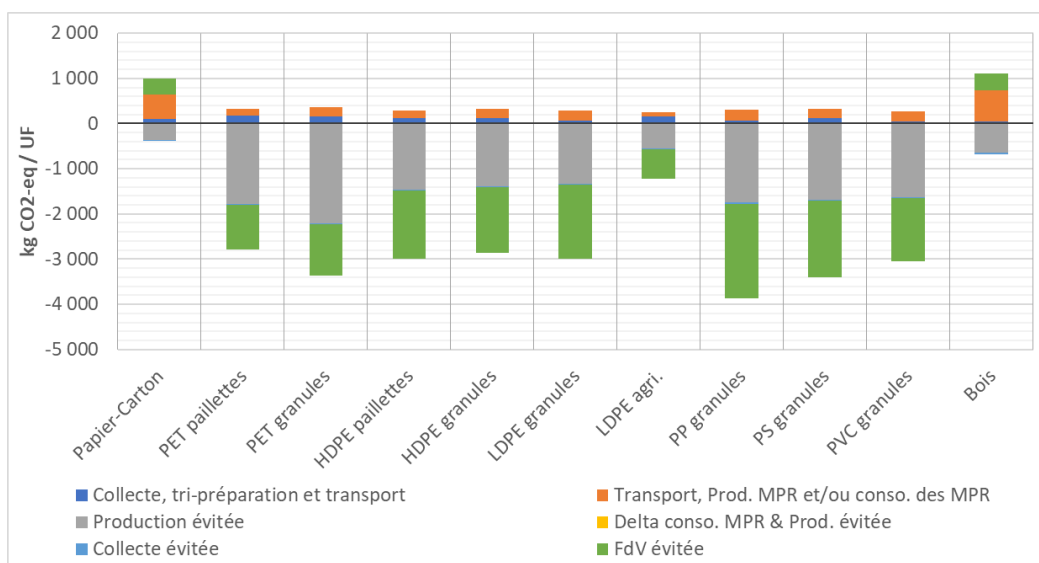
Les Figure 7-1 *Error! Reference source not found.* et Figure 7-2 présentent les résultats pour les indicateurs de changement climatique et d'utilisation des ressources fossiles.

Résultats sur le papier-carton et le bois : le choix d'évitement de l'incinération avec valorisation énergétique exerce une influence forte sur ces deux filières de recyclage puisqu'il apporte un impact (positif) supplémentaire. En effet, les émissions du cycle du carbone biogénique n'ayant pas d'influence sur la comptabilisation des émissions, c'est la valorisation énergétique du PCI qui domine les impacts environnementaux de cette phase. Ainsi avec l'évitement de l'incinération avec valorisation, on évite également la production d'énergie se substituant au mix énergétique français.

Résultats sur les plastiques : le choix d'évitement de l'incinération avec valorisation énergétique exerce une influence forte sur les résultats puisqu'il apporte un évitement supplémentaire à l'évitement de production de la matière vierge. Si dans l'indicateur de changement climatique ce sont les émissions liées à la combustion du plastique dans les incinérateurs qui contribuent le plus aux résultats, pour l'utilisation des ressources fossiles c'est le mix énergétique évité par la valorisation du PCI des déchets pour la part incinérée qui ont la plus forte contribution. Lorsqu'on considère que le recyclage permet d'éviter l'incinération avec valorisation énergétique, on évite également la production d'énergie se substituant au mix énergétique moyen de la zone géographique concernée (électrique et thermique)³⁷.

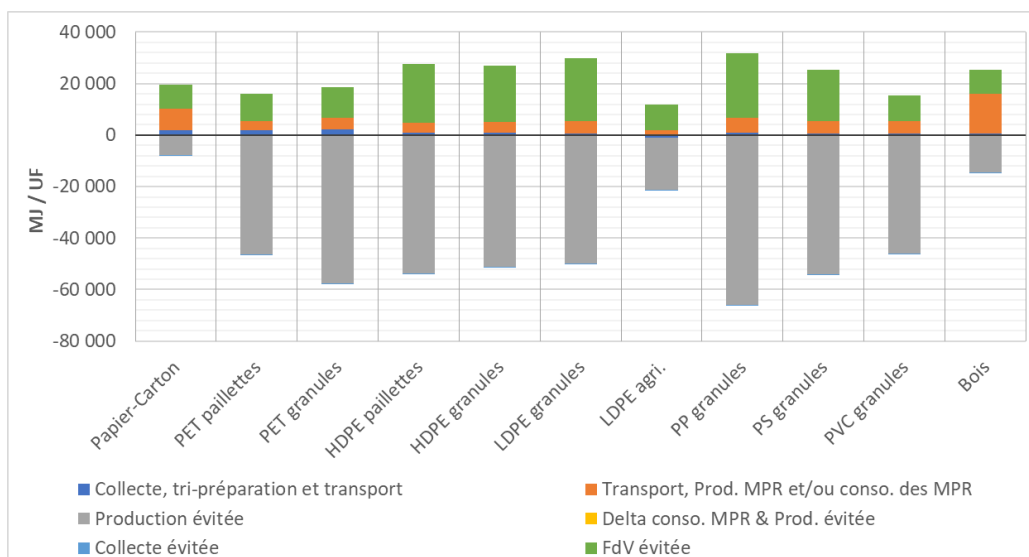
³⁷ France pour les déchets origine France et Europe pour les autres

Figure 7-1 : Résultats par phase pour le scénario de fin de vie évitée 100% incinération – Changement climatique



L'indicateur d'utilisation minérale n'est pas sensible au scénario de fin de vie évitée. On rappelle que les filières de recyclage des papiers-cartons et des plastiques présentent des résultats d'un ordre de grandeur bien moindre que les filières de recyclage des métaux.

Figure 7-2 : Résultats par phase pour le scénario de fin de vie évitée 100% incinération – Utilisation des ressources fossiles



Par ailleurs, on remarque que la valorisation énergétique du PCI des déchets en incinération permet d'éviter la production d'énergie³⁸. Lorsqu'on considère que le recyclage permet d'éviter l'incinération avec valorisation énergétique, on évite également cette substitution.

Les résultats positifs de la phase de fin de vie évitée pour l'indicateur d'eutrophisation sont également liés à la valorisation énergétique du PCI des déchets en incinération.

³⁸ Selon les résultats obtenus, les émissions de particules de la combustion de ces déchets dans les incinérateurs sont inférieures au mix énergétique substitué grâce à la valorisation énergétique (présence de charbon dans le mix chaleur substitué).

Sur base des tonnages totaux collectés par FEDEREC en 2021, les résultats pour les scénarios alternatifs de 100% incinération avec valorisation énergétique³⁹ et 100% mise en décharge sur l'indicateur de changement climatique sont illustrés dans le Tableau 7-1. Une comparaison est faite avec le scénario de référence étudié aux chapitres 5 et 6.

Tableau 7-1 : Comparaison des résultats sur le changement climatique entre les deux scénarios de fin de vie évitée (FdV) et le scénario de référence (mix)

	Changement climatique (kt CO ₂ -eq.)		
	Scénario de référence	FdV évitée (stockage)	FdV évitée (incinération)
Papier-Carton	336	-2 647	4 194
Plastiques	-1 778	-1 233	-2 396
Bois	271	-730	1 876
Total (toutes filières confondues)	-26 216	-29 641	-21 375

³⁹ pour les plastiques, le papier-carton et le bois

7.2 Influence du choix d'inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR – Filière aluminium

Dans la base de données Ecoinvent 3.7.1, deux inventaires sont disponibles pour modéliser l'étape d'incorporation des MPR :

1. *Treatment of aluminium scrap, at refiner* : soit le recyclage par fusion-affinage, applicable aux déchets de fabrication et aux déchets post-consommateur (Tableau 3-8) ;
2. *Treatment of aluminium scrap, at remelter* : soit le recyclage direct, généralement utilisé sur des flux purs (déchets de fabrication) (Tableau 7-2).

C'est le premier qui a été utilisé pour calculer les résultats présentés aux chapitres 5 et 6, la description précise se trouve en 3.2.4.2.

Tableau 7-2 : Inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR – Aluminium (remelter/recyclage direct)

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Treatment of aluminium scrap, at remelter, RER
Technologie modélisée	Four à réverbère
Représentativité géographique	Technologies employées en Europe
Représentativité temporelle	Inventaire basé sur des données EAA 2005 et des données plus anciennes d'Ecoinvent (elles-mêmes basées sur des données EAA plus anciennes)
Source et année de publication	Ecoinvent v3.7.1 (2022)
Mix électrique adaptable ?	Oui
Quantité de scrap d'aluminium entrant (t / tonne produite)	1,009

Dans cette analyse de sensibilité, l'influence de ce choix est évaluée en comparant les résultats produits par ces deux inventaires.

Tableau 7-3 : Résultats pour la filière aluminium par unité fonctionnelle selon l'inventaire utilisé à l'étape d'incorporation des MPR

Indicateur	Scénario	Résultat
Changement climatique (kg CO2-eq/UF)	TOTAL – Refiner/recyclage par fusion-affinage	-5 570
	TOTAL – Remelter/recyclage direct	-5 646
	<i>différence</i>	-1%
Utilisation ressources fossiles (MJ/UF)	TOTAL – Refiner/recyclage par fusion-affinage	-96 688
	TOTAL – Remelter/recyclage direct	-96 640
	<i>différence</i>	0%
Epuisement des ressources minérales (kg Sb-eq/UF)	TOTAL – Refiner/recyclage par fusion-affinage	-1.22E-02
	TOTAL – Remelter/recyclage direct	-1.24E-02
	<i>différence</i>	-2%
Emissions de particules (occurrences létales/UF)	TOTAL – Refiner/recyclage par fusion-affinage	-3.9E-04
	TOTAL – Remelter/recyclage direct	-3.9E-04
	<i>différence</i>	0%
Eutrophisation marine (kg P-eq/UF)	TOTAL – Refiner/recyclage par fusion-affinage	-4.89
	TOTAL – Remelter/recyclage direct	-4.90
	<i>différence</i>	0%

Comme illustré dans le Tableau 7-3, le choix de l'inventaire à l'étape d'incorporation des MPR n'influence pas significativement les résultats de la filière de recyclage de l'aluminium.

7.3 Sensibilité de la filière plastique aux inventaires de cycle de vie utilisés

Comme indiqué au chapitre 3.5, les inventaires utilisés pour modéliser la filière plastiques selon la destination des MPR préparés sont issus de deux sources :

1. RDC sur base de la littérature⁴⁰ : étapes de tri, collecte et préparation en vue de l'incorporation ;
2. Ecoinvent : production vierge évitée.

Comme expliqué au chapitre 2.10, ces inventaires sont utilisés sous un scope géographique européen.

En revanche lors du BNR 2019, étude sur laquelle est basée cette mise à jour, les inventaires utilisés étaient issus de sources différentes :

1. SRP : étapes de tri, collecte et préparation en vue de l'incorporation ;
2. PlasticsEurope : production vierge évitée.

L'influence de ce choix sur les résultats de la filière plastique est analysé ci-dessous.

Remarque : les inventaires SRP sont construits sous un scope géographique français, PlasticsEurope sous un scope géographique européen, ils sont agrégés et non modifiables. L'étape de préparation en vue de l'incorporation du scénario de référence a dès lors été adaptée pour afin d'assurer une comparaison objective (scope EU vers FR).

7.3.1 Inventaires issus du SRP

7.3.1.1 Étapes de collecte, tri et préparation des MPR en vue de l'incorporation

Remarque : Les inventaires de SRP prennent en compte toutes les étapes de la filière de manière agrégée. Les volumes entrants ne sont donc pas connus avec précision.

Remarque 2 : Par rapport au schéma des frontières du système présenté au chapitre 2.8, la fin de vie des pertes et indésirables est incluse dans l'analyse (car prise en compte dans les inventaires agrégés utilisés). C'est une déviation des règles méthodologiques définies dans cette étude.

Les inventaires de cycle de vie publiés par le SRP contiennent toutes les étapes de recyclage depuis la collecte jusqu'à la régénération de la matière.

Selon la note méthodologique accompagnant les inventaires de cycle de vie⁴¹ les frontières du système sont les suivantes :

« Chaque système de production d'un type de MPR est la somme de deux étapes :

- **Etape 1** « Collecte et tri initial » : données issues des informations fournies par les sites et de la contribution d'Eco-Emballages dans le cas des déchets d'emballages ménagers.

⁴⁰ Melanie Haupt et al, Life cycle inventories of waste management processes, 2018

⁴¹ Etude ICV des MPR, Principes méthodologiques de l'étude, Mars 2017, SRP

- **Etape 2 « Régénération »** : données moyennes pondérées des sites des régénérateurs.

Sont inclus dans le système :

- **Etape 1** : les consommations et émissions liées à la collecte, au transport, au tri, telles que fournies par les sites ou mises à disposition par Eco-Emballages (aujourd'hui CITEO). Règle d'affectation massive au prorata des masses de matières triées (papier, plastiques, etc.).
- **Etape 2** : les consommations et émissions liées à la régénération proprement dite, comprenant :
 - 2.1 Les transports d'approvisionnement des matières premières
 - 2.2 Les déchets de la régénération :
 - 2.2.1 Déchets éliminés en décharge : transport des déchets, opérations de mise en décharge
 - 2.2.2 Déchets éliminés par incinération :
 - ❖ 2.2.2.1 Déchets "vrais" (indésirables) : transport des déchets, impacts de l'incinération (CO₂, etc.), aucun bénéfice.
 - ❖ 2.2.2.2 Déchets valorisés énergétiquement (CSR ou combustibles « propres ») : transport des déchets, impacts de l'incinération (CO₂, etc.), moins les bénéfices (kWh, chaleur).
 - 2.2.3 Déchets régénérés ailleurs :
 - ❖ 2.2.3.1 Déchets prétraités destinés à devenir des MPR après régénération chez un confrère régénérateur, recyclés chez un autre recycleur : les impacts sont pris en compte par l'autre régénérateur afin d'éviter les risques de double comptage.
 - ❖ 2.2.3.2 Déchets recyclés dans une autre filière (métaux, etc.) : transport des déchets, impacts de la régénération, moins les bénéfices.
 - 2.3 La production des emballages approvisionnés pour les MPR.
 - 2.4 Les consommations des procédés de régénération : production des énergies consommées (électricité, combustibles), des consommables ; prélèvement d'eau.
 - 2.5 Les émissions des procédés dans l'air et dans l'eau ; le flux d'eau émis.
 - 2.6 Une évaluation des infrastructures sur la base d'un modèle-type d'atelier (bâtiments en acier, aires de stockage en routes) »

Tableau 7-4 : Inventaire de l'étape de préparation des MPR (en vue de l'incorporation) – Plastiques vendus en France

Nom de l'inventaire	Étape du cycle de vie
ICV de R-PET paillettes, FR, SRP	Collecte et tri initial
	Régénération
ICV de R-PET granulés, FR, SRP	Collecte et tri initial
	Régénération
ICV de R-PEHD paillettes, FR, SRP	Collecte et tri initial
	Régénération
ICV de R-PEHD granulés, FR, SRP	Collecte et tri initial

	Régénération
ICV de R-PEBD granulés, FR, SRP	Collecte et tri initial
	Régénération
ICV de R-PEBD granulés agri, FR, SRP	Collecte et tri initial
	Régénération
ICV de R-PP granulés, FR, SRP	Collecte et tri initial
	Régénération
ICV de R-PVC granulés, FR, SRP	Collecte et tri initial
	Régénération
ICV de R-PS granulés, FR, SRP	Collecte et tri initial
	Régénération

Les inventaires ont été établis à partir des informations portant sur l'année 2015, transmises par les membres du SRP qui produisent ces MPR sur leurs sites de production situés en France métropolitaine.

7.3.1.2 Inventaires pour l'étape de production vierge évitée

Tableau 7-5 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PET

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Polyethylene terephthalate, granulate, bottle grade, at plant, RER
Technologie modélisée	Mix de technologies en Europe
Représentativité géographique	Europe (Couvre 77% PET « bottle grade » EU)
Représentativité temporelle	Données d'activité 2015
Source et année de publication	Plastics Europe (2017)
Mix électrique	Europe

Tableau 7-6 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PEhd

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Plastics Europe : Polyethylene, HDPE, granulate, at plant - RER
Technologie modélisée	Mix de technologies en Europe
Représentativité géographique	UE 27 + Norvège + Suisse
Représentativité temporelle	Données d'activité 2015
Source et année de publication	Plastics Europe (2019)
Mix électrique	Europe

Tableau 7-7 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PEbd

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Polyethylene, PEBD, granulate, at plant, RER
Technologie modélisée	Mix de technologies en Europe
Représentativité géographique	UE 27 + Norvège + Suisse

Représentativité temporelle	Données d'activité 2015
Source et année de publication	Plastics Europe (2019)
Mix électrique	Europe

Tableau 7-8 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PP

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Polypropylène, PP, granulate, at plant, RER
Technologie modélisée	Mix de technologies en Europe
Représentativité géographique	UE 27 + Suisse + Norvège (77% de la production UE)
Représentativité temporelle	Données d'activité 2011
Source et année de publication	Plastics Europe (2014)
Mix électrique	Europe

Tableau 7-9 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PVC

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Polyvinyl chloride, from suspension process, S-PVC, at plant
Technologie modélisée	Mix de production des technologies commerciales de production de S-PVC, Le chlorure de polyvinyle (PVC) est fabriqué par polymérisation du chlorure de vinyle monomère
Représentativité géographique	Europe
Représentativité temporelle	Données d'activité 2011
Source et année de publication	Plastics Europe (2015)
Mix électrique	Europe

Tableau 7-10 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PS

Paramètre	Donnée
Nom de l'ICV	Polystyrene granulate (PS)
Technologie modélisée	Mix de technologies en Europe
Représentativité géographique	Europe (couvre 95% de la production de PS de l'UE sur 24 sites)
Représentativité temporelle	Données d'activité 2011
Source et année de publication	Plastics Europe (2015)
Mix électrique	Europe

7.3.2 Résultats de la comparaison

Cette analyse de sensibilité compare donc la situation de référence (Ecoinvent et modélisation RDC) avec un scénario dans lequel ce sont les ICVs SRP et Plastics Europe qui ont été utilisés. Dans les deux cas la fin de vie considérée reste identique à ce qui est présenté au chapitre 3.9.

Les résultats de l'analyse sont présentés dans le Tableau 7-11.

Tableau 7-11 : Résultats (tonnages FEDEREC 2021) de la comparaison entre la modélisation de référence et la modélisation fédération SRP – Filière plastiques

Indicateur	Scénario	Résultat
Changement climatique (kt CO2-eq)	TOTAL – Scénario de référence	-1 778
	TOTAL – Scénario SRP	-1 660
	<i>différence</i>	+ 6%
Utilisation ressources fossiles (TJ)	TOTAL – Scénario de référence	-33 264
	TOTAL – Scénario SRP	-25 770
	<i>différence</i>	+ 22%
Épuisement des ressources minérales (t Sb-eq)	TOTAL – Scénario de référence	-13
	TOTAL – Scénario SRP	-7
	<i>différence</i>	+ 46%
Émissions de particules (occurrences létales)	TOTAL – Scénario de référence	-36
	TOTAL – Scénario SRP	-6
	<i>différence</i>	+ 83%
Eutrophisation marine (kg P-eq)	TOTAL – Scénario de référence	-970
	TOTAL – Scénario SRP	-740
	<i>différence</i>	+ 23%

La tendance générale montre que l'utilisation des inventaires SRP présente des contributions similaires sur le changement climatique et des contributions plus élevées sur l'utilisation des ressources fossiles, l'épuisement des ressources minérales (indicateur peu pertinent pour les plastiques), les émissions de particules et l'eutrophisation marine. Il n'est pas possible de connaître les raisons de ces écarts puisque les inventaires SRP sont agrégés. Cependant en se référant au rapport, on peut supposer que les écarts sont les suivants :

- consommations énergétiques différentes,
- prise en compte du traitement des indésirables dans SRP (ce n'est pas le cas dans cette étude),
- choix des données d'arrière-plan.

7.4 Sensibilité de la filière plastique au matériau évité

En scénario de base, on considère que la filière de recyclage permet d'éviter la production d'un matériau vierge de même nature.

Cependant ce n'est pas toujours le cas pour la filière plastique : il existe une multitude de scénarii pour un même matériau recyclé puisque la production de vierge évitée dépend avant tout de l'application qui est faite du matériau recyclé. Par exemple, le recyclage de plastiques (PP choisi arbitrairement dans le cas de cette analyse de sensibilité) en mobilier urbain entraîne un évitement d'un mobilier urbain produit avec des matériaux vierges présentant une grande diversité en composition et en forme.

Dans cette analyse de sensibilité, deux situations sont étudiées :

- Les MPR de PP se substitue à du béton (market for concrete, normal, RoW, EI v3.7.1) ;
- Les MPR de PP se substitue à du bois (sawwood production, hardwood, raw, dried (u=20%), RER, EI v3.7.1).

Remarque : on considère donc un évitement de production de béton ou de bois mais également un évitement d'une fin de vie de ces mêmes matériaux en centre de stockage. Pour le bois la fin de vie est modélisée selon les mêmes hypothèses listées en section 3.9.2, dans les mêmes proportions discutées en 3.7 (origine des flux de déchets).

Remarque 2 : les choix des matériaux étudiés est arbitraire. Cette analyse de sensibilité a vocation à présenter la variation possible des résultats dans le cas de recyclage vers des applications diverses (généralement appelé downcycling car le matériau n'est ensuite plus recyclable ou recyclé).

Le volume substitué est calculé en tenant compte des paramètres suivants :

- La densité du PP, définie entre 850 et 950 kg / m³ ;
- La densité du béton : 2380 kg / m³ (donnée Ecoinvent associée à l'inventaire de cycle de vie utilisé) ;
- La densité du bois : 780 kg / m³ (donnée Ecoinvent associée à l'inventaire de cycle de vie utilisé) ;
- un taux de substitution défini entre 0.5 et 1.5 correspondant au volume nécessaire pour produire un même produit avec deux matériaux différents ou avec deux durées de vies différentes. En effet, les caractéristiques du PP pourrait permettre de produire des objets moins volumineux ou moins durable dans le temps (facteur < 1) ou plus volumineux ou plus durable dans le temps (facteur > 1) selon la diversité des situations possibles.

Les résultats pour l'indicateur changement climatique sont respectivement présentés pour une substitution au béton et au bois dans les figures ci-après.

Figure 7-3 : Sensibilité des résultats de la filière de recyclage PP au changement climatique (CC) du scénario de substitution des MPR de PP par du béton

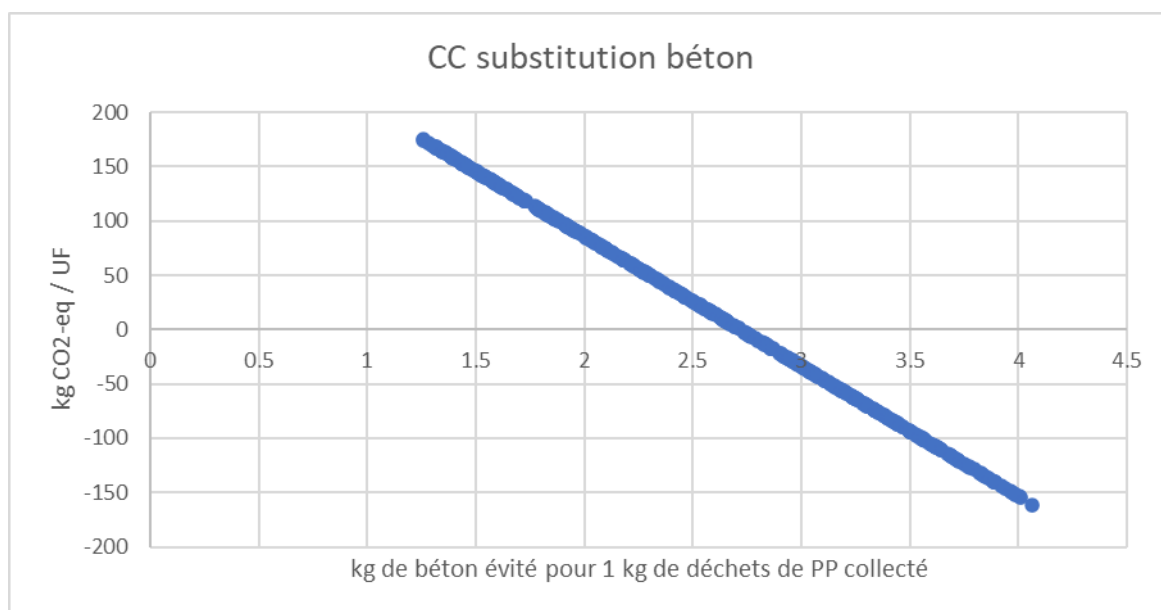
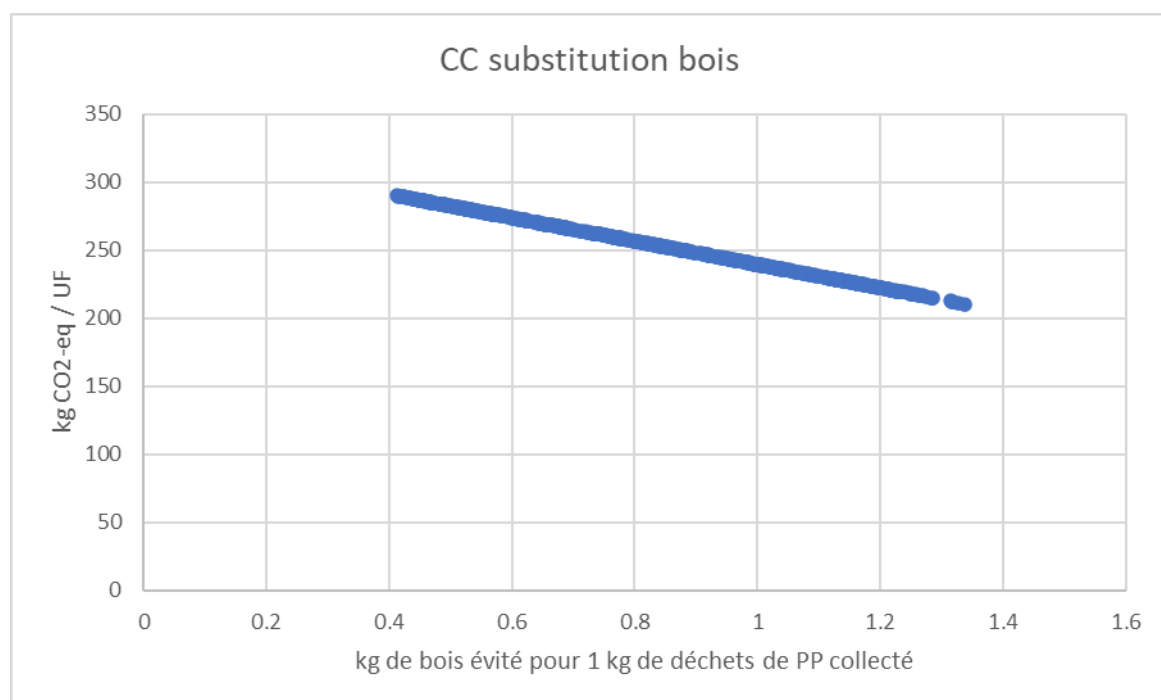


Figure 7-4 : Sensibilité des résultats de la filière de recyclage PP au changement climatique (CC) du scénario de substitution des MPR de PP par du bois



L'axe des ordonnées représente la contribution totale de la filière de recyclage PP à l'indicateur de changement climatique. L'axe des abscisses représente la masse de béton ou de bois évitée par l'utilisation de MPR PP.

Pour le scénario de substitution au béton, les résultats oscillent entre -160 kg CO₂-eq/ UF et 170 kg CO₂-eq/ UF.

On constate que plus la masse de béton substituée est élevée plus les résultats sur le changement climatique sont faibles : à partir de 2.7 kg de béton substitué, les impacts de la chaîne de recyclage

sont compensés par les évitements du recyclage (évitement de production de béton mais également d'une fin de vie du béton).

Pour le scénario de substitution au bois, les résultats oscillent entre 210 kg CO₂-eq/ UF et 300 kg CO₂-eq / UF. Ces impacts élevés sont liés à la fin de vie évitée qui, dans le cas de cette analyse de sensibilité, est 100% d'élimination en centre de stockage.

7.5 Sensibilité de la filière bois à la part d'énergie biosourcée utilisée en étape de production vierge évitée

Dans cette analyse de sensibilité, c'est l'influence de la part d'énergie biosourcée pour la production de chaleur qui est évaluée. Comme indiqué dans le Tableau 3-48, il est effectivement considéré que 1/3 de la chaleur nécessaire au séchage de l'étape de production vierge évitée provient des déchets de bois de sciage des panneaux.

Les résultats pour le scénario où la proportion d'énergie biosourcée est égale à 0% sont présentés en Tableau 7-12.

Tableau 7-12 : Résultats pour la filière bois par unité fonctionnelle selon la proportion de chaleur biosourcée utilisée pour l'étape de séchage

Indicateur	Scénario	Résultats
Changement climatique (kg CO₂-eq/UF)	TOTAL - Scénario de référence	61
	TOTAL - Chaleur d'origine 100% fossile	-40
	<i>différence</i>	-163%
Utilisation ressources fossiles (MJ/UF)	TOTAL - Scénario de référence	4 756
	TOTAL - Chaleur d'origine 100% fossile	2 895
	<i>différence</i>	-39%
Epuisement des ressources minérales (kg Sb-eq/UF)	TOTAL - Scénario de référence	4.9E-04
	TOTAL - Chaleur d'origine 100% fossile	5.4E-04
	<i>différence</i>	10%
Emissions de particules (occurrences létales/UF)	TOTAL - Scénario de référence	-7.92E-07
	TOTAL - Chaleur d'origine 100% fossile	2.5E-05
	<i>différence</i>	
Eutrophisation marine (kg P-eq/UF)	TOTAL - Scénario de référence	-0.14
	TOTAL - Chaleur d'origine 100% fossile	-0.04
	<i>différence</i>	71%

Cette analyse de sensibilité illustre bien l'influence qu'exerce l'hypothèse concernant la proportion d'énergie biosourcée consommée sur les résultats globaux de cette filière.

Étant donné qu'il n'a pas été possible de confirmer cette hypothèse auprès des adhérents FEDEREC concernés, nous conseillons d'interpréter les résultats de cette filière avec prudence. L'utilisation d'énergie biosourcée au cours du procédé de production de panneaux à partir de matières vierges a pour effet de diminuer les impacts environnementaux de cette étape et par conséquent de mitiger les bénéfices environnementaux du recyclage. C'est particulièrement visible pour l'indicateur de changement climatique avec des émissions de CO₂ dans le cas du scénario de référence et des évitement lorsqu'une énergie 100% d'origine fossile est considérée.

8 Conclusions

Cette étude est la première mise à jour du rapport d'évaluation environnementale du recyclage en France de 2017 avec les chiffres représentatifs de l'année 2020 sur base des filières et de la méthodologie du BNR 2019, avec la nuance suivante :

L'unité fonctionnelle de la présente étude est *l'analyse de la collecte, du tri et de la transformation d'une tonne de déchets afin de produire des matériaux intermédiaires issus de MPR en substitution de matériaux intermédiaires issus de ressources vierges*.

Cette modification d'UF présente un enjeu majeur sur le champ géographique du système considéré et plus particulièrement sur les deux étapes dont l'influence sur les résultats est significative : l'incorporation des MPR et la production vierge évitée. Il est en effet certifié que les étapes de collecte et de tri des déchets ont lieu sur le sol français et la répartition des tonnages vendus selon leur destination est connue mais il n'est pas possible d'attribuer une zone géographique d'évitement de production vierge liée au recyclage d'un matériau.

Afin d'éviter tout biais d'interprétation, il a été choisi de favoriser la cohérence méthodologique avec le BNR en considérant un scope européen pour ces deux étapes structurantes.

Un second élément différenciant est l'hypothèse de fin de vie évitée. Là où il a précédemment été considéré que le recyclage de déchets permettait d'éviter l'élimination de ces mêmes déchets en centre de stockage, cette mise à jour présente des résultats pour un mix de fin de vie évité « incinération et stockage ».

Deux pourcentages ont été déduits de l'enquête ITOM 2020 : la proportion de déchets issus (i) des DMA et (ii) des DAE envoyés en centre de stockage. La quantité restante est envoyée en centre d'incinération. Une analyse de sensibilité portant spécifiquement sur cet enjeu a démontré que ce choix d'hypothèse exerce une influence notable sur les résultats des filières de matériaux combustibles (papier-carton, bois et plastiques).

Les résultats pour les tonnages collectés par FEDEREC en 2020 pour les 5 indicateurs pertinents sont présentés dans les tableaux ci-dessous. Les fourchettes de valeur min-max sont calculées en tenant comptes des incertitudes liées aux données d'inventaires (les analyses de sensibilité ne sont pas incluses dans la définition des minimums et maximums).

Tableau 8-1 : Résultats de la mise à jour pour le changement climatique (tonnages FEDEREC 2020)

Fin de vie évitée :	Changement climatique (kt CO2-eq)		
	Mix	Incinération	Stockage
Minimum	-31 165	-26 477	-34 871
Moyen	-26 216	-21 375	-29 641
Maximum	-21 249	-16 272	-24 363

Tableau 8-2 : Résultats de la mise à jour pour l'utilisation des ressources fossiles (tonnages FEDEREC 2020)

Fin de vie évitée :	Utilisation des ressources fossiles (TJ)		
	Mix	Incinération	Stockage
Minimum	-269 790	-198 682	-318 887
Moyen	-201 776	-132 547	-252 210
Maximum	-133 655	-60 141	-184 771

Tableau 8-3 : Résultats de la mise à jour pour l'utilisation des ressources minérales et métalliques (tonnages FEDEREC 2020)

Fin de vie évitée :	Utilisation des ressources fossiles (t Sb-eq)		
	Mix	Incinération	Stockage
Minimum	-1 221	-1 220	-1 223
Moyen	-1 073	-1 071	-1 073
Maximum	-926	-925	-927

Tableau 8-4 : Résultats de la mise à jour pour les émissions de particules (tonnages FEDEREC 2020)

Fin de vie évitée :	Émissions de particules (occurrences létales)		
	Mix	Incinération	Stockage
Minimum	-2 350	-2 313	-2 166
Moyen	-1 960	-1 923	-1 856
Maximum	-1 568	-1 531	-1 561

Tableau 8-5 : Résultats de la mise à jour pour l'eutrophisation marine (tonnages FEDEREC 2020)

Fin de vie évitée :	Eutrophisation des eaux marines (t N-eq)		
	Mix	Incinération	Stockage
Minimum	-18 103	-9 718	-24 647
Moyen	-13 967	-5 932	-20 306
Maximum	-9 796	-2 159	-16 386

Les résultats de cette étude sont exprimés par unité fonctionnelle dans le Tableau 8-6 ci-dessous.

Pour rappel, le scénario de fin de vie évité de référence est ici le mix d'incinération et de stockage, dépendant de l'origine de des déchets (DMA ou DAE) tandis les champs géographiques sont la France pour les étapes de collecte et de tri et l'Europe pour les étapes de production, d'incorporation de la MPR et de production vierge évitée.

Tableau 8-6 : Résultats de la mise à jour par filière et par unité fonctionnelle (1/2)

	Ferraille	Cuivre	Alumi- nium	Plomb	Zinc	Papier- Carton	Verre emb.	Verre plat	Inertes	Bois
Changement climatique (kg CO2-eq/UF)										
Filière recyclage	-1 477	730	449	909	1 413	643	-647	-532	30	738
Filière vierge évitée		-2 738	-5 900	-1 663	-2 538	-369			0	-652
Collecte non sélective et fin de vie évitée	-25	-51	-58	-24	-55	-225	-32	-30	-31	-25
TOTAL	-1 502	-2 059	-5 510	-778	-1 179	49	-679	-562	-1	61
Utilisation des ressources fossiles (MJ/UF)										
Filière recyclage	-11 568	12 982	6 786	7 759	32 952	10 115	-5 476	-4 867	497	16 045
Filière vierge évitée		-30 003	-101 495	-17 976	-45 115	-7 778			0	-14 470
Collecte non sélective et fin de vie évitée	-439	-817	-937	-475	-895	3 971	-572	-547	-531	3 181
TOTAL	-12 007	-17 839	-95 647	-10 692	-13 058	6 308	-6 048	-5 414	-34	4 756
Utilisation des ressources fossiles et renouvelables (MJ/UF)										
Filière recyclage	-10 454	14 572	6 953	7 763	35 678	12 098	-6 053	-5 347	508	18 813
Filière vierge évitée		-33 186	-137 775	-17 976	-49 953	-32 379			0	-24 758
Collecte non sélective et fin de vie évitée	-444	-850	-974	-481	-933	4 076	-579	-555	-538	3 266
TOTAL	-10 898	-19 464	-131 796	-10 694	-15 208	-16 205	-6 633	-5 902	-30	-2 679
Utilisation des ressources minérales et métalliques (kg Sb-eq/UF)										
Filière recyclage	-2.5E-02	9.5E-03	1.7E-03	2.0E-03	3.3E-02	3.0E-03	-9.5E-03	-7.3E-03	2.6E-04	6.0E-03
Filière vierge évitée		-1.8E+00	-1.4E-02	-1.8E-01	-1.4E+00	-2.4E-03			-6.6E-08	-5.4E-03
Collecte non sélective et fin de vie évitée	-1.3E-04	-2.0E-04	-2.3E-04	-9.7E-05	-1.6E-04	-6.3E-05	-1.3E-04	-1.8E-04	-2.2E-04	-1.4E-04
TOTAL	-2.5E-02	-1.8E+00	-1.2E-02	-1.8E-01	-1.4E+00	5.8E-04	-9.6E-03	-7.5E-03	3.5E-05	4.9E-04
Émissions de particules (occurrences létales/UF)										
Filière recyclage	-5.5E-05	4.1E-05	1.6E-05	3.2E-04	6.3E-05	2.2E-05	-2.2E-05	-2.8E-05	1.8E-06	5.8E-05
Filière vierge évitée		-8.6E-04	-4.4E-04	-1.5E-04	-1.1E-04	-1.3E-04			-5.9E-10	-5.8E-05
Collecte non sélective et fin de vie évitée	-1.8E-06	-4.0E-06	-4.5E-06	-1.8E-06	-4.5E-06	-4.7E-07	-3.7E-06	-2.7E-06	-2.2E-06	-9.2E-07
TOTAL	-5.7E-05	-8.2E-04	-4.3E-04	1.8E-04	-5.6E-05	-1.1E-04	-2.5E-05	-3.1E-05	-4.3E-07	-7.9E-07
Eutrophisation des eaux marines (kg N-eq/UF)										
Filière recyclage	-0.49	1.00	0.36	0.74	3.46	1.54	-0.32	-0.28	0.04	0.68
Filière vierge évitée		-4.38	-5.11	-2.45	-5.84	-0.59			0.00	-0.58
Collecte non sélective et fin de vie évitée	-0.04	-0.08	-0.09	-0.04	-0.08	-0.95	-0.06	-0.05	-0.05	-0.24
TOTAL	-0.53	-3.45	-4.85	-1.75	-2.46	0.00	-0.38	-0.33	-0.01	-0.14

Tableau 8-7 : Résultats de la mise à jour par filière et par unité fonctionnelle (2/2)

	PET pail- lettes	PET gra- nules	HDPE paillettes	HDPE granules	LDPE gra- nules	LDPE agri.	PP gra- nules	PS gra- nules	PVC gra- nules
Changement climatique (kg CO2-eq/UF)									
Filière recyclage	322	364	294	321	286	254	312	324	270
Filière vierge évitée	-1 781	-2 210	-1 455	-1 388	-1 342	-546	-1 752	-1 680	-1 628
Collecte non sélective et fin de vie évitée	-735	-840	-870	-831	-715	-266	-994	-876	-520
TOTAL	-2 194	-2 686	-2 031	-1 898	-1 771	-557	-2 434	-2 231	-1 879
Utilisation des ressources fossiles (MJ/UF)									
Filière recyclage	5 273	6 668	4 842	5 242	5 286	991	6 585	5 392	5 494
Filière vierge évitée	-46 414	-57 615	-53 579	-51 106	-49 732	-20 209	-65 846	-54 112	-46 025
Collecte non sélective et fin de vie évitée	7 023	7 789	11 423	10 881	8 817	2 874	10 021	8 797	2 723
TOTAL	-34 119	-43 157	-37 314	-34 982	-35 630	-16 344	-49 240	-39 923	-37 808
Utilisation des ressources fossiles et renouvelables (MJ/UF)									
Filière recyclage	5 705	7 278	5 312	5 792	5 886	1 209	7 295	5 988	6 122
Filière vierge évitée	-47 671	-59 175	-54 401	-51 890	-50 850	-20 664	-66 690	-54 598	-47 985
Collecte non sélective et fin de vie évitée	7 195	7 983	11 703	11 148	9 034	2 946	10 267	9 012	2 731
TOTAL	-34 772	-43 914	-37 385	-34 950	-35 930	-16 508	-49 128	-39 599	-39 132
Utilisation des ressources minérales et métalliques (kg Sb-eq/UF)									
Filière recyclage	2.1E-03	2.6E-03	2.2E-03	2.3E-03	2.4E-03	1.1E-03	2.8E-03	2.4E-03	2.5E-03
Filière vierge évitée	-2.4E-02	-3.0E-02	-1.0E-02	-9.9E-03	-9.5E-03	-3.9E-03	-1.2E-02	-9.6E-03	-3.2E-02
Collecte non sélective et fin de vie évitée	2.8E-05	3.3E-05	1.0E-04	9.2E-05	5.5E-05	-3.3E-05	-8.7E-05	-1.3E-04	-5.9E-04
TOTAL	-2.2E-02	-2.7E-02	-8.1E-03	-7.5E-03	-7.0E-03	-2.8E-03	-9.5E-03	-7.3E-03	-3.0E-02
Émissions de particules (occurrences létales/UF)									
Filière recyclage	1.4E-05	1.6E-05	1.4E-05	1.4E-05	1.3E-05	6.4E-06	1.5E-05	1.3E-05	1.3E-05
Filière vierge évitée	-6.9E-05	-8.5E-05	-5.1E-05	-4.9E-05	-4.5E-05	-1.8E-05	-6.3E-05	-3.8E-05	-5.3E-05
Collecte non sélective et fin de vie évitée	1.3E-06	1.9E-06	4.2E-06	4.0E-06	2.8E-06	3.9E-07	2.4E-06	2.3E-06	-3.3E-06
TOTAL	-5.3E-05	-6.8E-05	-3.3E-05	-3.1E-05	-2.9E-05	-1.2E-05	-4.5E-05	-2.2E-05	-4.3E-05
Eutrophisation des eaux marines (kg N-eq/UF)									
Filière recyclage	0.38	0.44	0.33	0.34	0.30	0.16	0.36	0.33	0.29
Filière vierge évitée	-1.41	-1.75	-0.93	-0.89	-0.93	-0.38	-1.05	-0.96	-1.32
Collecte non sélective et fin de vie évitée	-0.54	-0.59	-0.11	-0.11	-0.20	-0.11	-0.23	-0.25	-0.34
TOTAL	-1.56	-1.90	-0.72	-0.65	-0.83	-0.33	-0.92	-0.88	-1.37

Pour rendre objective la lecture des conclusions de cette étude, plusieurs éléments sont à garder à l'esprit.

En tant que produits finis, **les matériaux vierges ou recyclés ne sont pas toujours substituables.**

La comparaison entre deux filières (vierge et recyclage) est vraie tant que le marché n'est pas totalement bouleversé. Les effets de la disparition d'une filière ou d'une autre auraient de plus grandes conséquences que les effets de la substitution simple, mais ce scénario n'est pas considéré dans cette étude.

La notion de **fin de vie évitée** est un élément perturbant la compréhension de la performance du recyclage. Plus le traitement de fin de vie est performant (par exemple avec des rendements élevés de valorisation énergétique du PCI des déchets en incinération), plus les performances du recyclage sont contrebalancées. Ce point d'attention est vrai aussi pour la **production vierge évitée** même si la logique s'inverse. En effet plus la production vierge sera impactante, plus les bénéfices environnementaux du recyclage seront élevés. Il est dès lors nécessaire de choisir avec précaution le champ géographique de la production évitée, comme discuté au chapitre 2.10.

Toujours dans les notions d'évitement, la définition du type de **traitement évité** n'est pas toujours aisé car les filières de recyclage sont devenues incontournables pour un certain nombre de filières. Il n'est par exemple pas envisageable d'éliminer des déchets cuivre ou aluminium en centre de stockage.

L'ensemble des procédés de recyclage existants pour une filière n'est pas évalué. En règle générale, la principale (ou les deux principales) technologies employées sont étudiées pour la filière de recyclage mais l'approche par matériau mène inévitablement à des imprécisions sur des filières spécifiques comme :

- la filière de recyclage des déchets électriques et électroniques, qui est modélisée grossièrement alors qu'en réalité de nombreuses étapes de tri/préparation des DEEE sont indispensables à la séparation des flux à recycler ;
- la filière des VHU, pour les mêmes raisons que les DEEE ;
- les filières des métaux non-ferreux contenant des câbles, pour les mêmes raisons que les DEEE ;
- la filière des plastiques, lorsqu'ils sont recyclés en mélange (par exemple pour fabriquer du mobilier urbain) ou lorsqu'ils sont recyclés par voie chimique pour être incorporé en amont de la production de granules ;
- la filière de recyclage des inertes du BTP, lorsque les matériaux à recycler sont réincorporés dans la fabrication de matériaux utilisés dans le BTP comme le béton.

Le **downcycling des plastiques n'est pas étudié** alors que les plastiques recyclés de qualité moindre peuvent en général être utilisés en substitution de matériaux tels que le béton ou le bois.

Enfin et surtout, **l'étude n'arbitre pas entre les acteurs de la filière.** Les charges et bénéfices du recyclage ne sont pas alloués.

9 Références bibliographiques

Les principaux documents et études auxquels cette étude fait référence sont synthétisés dans ce chapitre (hors inventaires de cycle de vie utilisés).

- ADEME, 2007 – *Enquête collecte, Analyse des distances parcourues par les bennes de collecte des ordures ménagères, octobre 2009*
- ADEME, 2019 – *Analyse du cycle de vie des flux de déchets recyclés sur le territoire français – Rapport. 142 pages*
- ADEME. J.Lhotellier. 2019. *Analyse du cycle de vie des flux de déchets recyclés sur le territoire français – Rapport. 142 pages.*
- ADEME, 2020 – *Automobiles – Données 2019 – Rapport annuel*
- ADEME, 2020 – *Registre DEEE - Rapport Annuel - Données 2019*
- ADEME, 2020 – *Le traitement des déchets ménagers et assimilés – ITOM 2020*
- ADEME, 2020 - *Rapport annuel de l'Observatoire de la filière des véhicules hors d'usage - Données 2018*
- *Au-Dev-ant, Manuel TrarieuX. ADEME, Chloé HOUDUS. Septembre 2021. Eléments d'Ameublement : données 2020 – Rapport annuel – 58 pages*
- *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Wood-based Panels, 2016*
- *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Treatment, JRC, 2018*
- *Beylot, A., Muller, S., Descat, M., Ménard, Y., Michel, P. 2017. L'outil WILCI pour l'Analyse du Cycle de Vie de l'incinération des Déchets Ménagers et Assimilés en France. Rapport final du projet de recherche PCI. 80 pages.*
- *Carbotech - Technical report_V1.0 – sorting of PE bottles (2017)*
- *CEPI statistics, CEPI Pulp and Paper Industry in 2021*
- *Commission recommendation of 16.12.2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life, Annex 1 - Product Environmental Footprint Method*
- *DEPARTMENT OF TOXIC SUBSTANCES CONTROL (california) - Evaluation and Analysis of Metal Shredding Facilities and Metal Shredder Wastes - August 2021*
- *Eco-emballages, Eco-Embes, Sociedad Ponto Verde and FOST Plus, March 2009 – Environmental and Economic analysis of end-life of packaging in MSW*
- *EU-MERCI 2020, Technical analysis – Glass sector*
- *F.A. Ximenes, W.D. Gardner, A.L. Cowie, The decomposition of wood products in landfills in Sydney, Australia, 2008.*
- *Fazio, S. Castellani, V. Sala, S., Schau, EM. Secchi, M. Zampori, L., Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment methods, EUR 28888 EN, European Commission, Ispra, 2018, ISBN 978-92-79-76742-5, doi:10.2760/671368, JRC109369*
- *FEDEREC, mars 2017 – Évaluation environnementale du recyclage en France selon la méthodologie de l'analyse du cycle de vie*
- *GLS-BREF, (2013), European Commission, Joint Research Centre, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU. ScaletBianca Maria, Garcia Munos Marcos, Sissa Aivi Querol, Roudier Serge, Delgado Sancho Luis*
- *ISO 14040 :2006, Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre*
- *ISO 14044 :2006, Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrice*

- ISO 14067:2018, Gaz à effet de serre — Empreinte carbone des produits — Exigences et lignes directrices pour la quantification
- James B. Wilson, LIFE-CYCLE INVENTORY OF PARTICLEBOARD IN TERMS OF RESOURCES, EMISSIONS, ENERGY AND CARBON, Oregon State University, April 2009
- Kai-Uwe Heyer *, Karsten Hupe and Rainer Stegmann, ADAPTATION OF IPCC DEFAULT VALUES ON NATIONAL LANDFILL CONDITIONS, IFAS, Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft, Prof. R. Stegmann und Partner, Hamburg, Germany, 2018
- Melanie Haupt et al, Life cycle inventories of waste management processes, 2018
- PADGETT, JENNIFER. Biodegradability of Wood Products under Simulated Landfill Conditions. (Thesis Under the direction of Dr. Morton A. Barlaz), 2009.
- Xiaoming Wang, Jennifer M. Padgett, Florentino B. De la Cruz, Morton A. Barlaz. Wood Biodegradation in Laboratory-Scale Landfills. Environ. Sci. Technol. 2011, 45, 16, 6864-6871 (<https://doi.org/10.1021/es201241q>)
- Quirijnen L. (1999) How to implement efficient local lead-acid battery recycling. In: Journal of Power Sources, 78(1-2), pp. 267-269
- ScoreLCA, juin 2015 – Les différentes sources d'incertitudes en ACV, leurs modes de calcul et impacts sur l'interprétation
- SRP (2018), Etude ICV des MPR, Principes méthodologiques de l'étude
- Worldsteel 2019, LCA methodology report

10 Table des tableaux

Tableau 1-1 : Exemple simplifié de caractérisation des impacts pour la catégorie d'impacts « changement climatique ».....	10
Tableau 2-1 : Évolution des filières de recyclage étudiées	11
Tableau 2-2 : Tonnages totaux collectés – Chiffres FEDEREC 2021 (pour les matériaux retenus dans l'étude).....	13
Tableau 2-3 : Catégories d'impacts potentiels étudiées	14
Tableau 2-4 : Répartition des tonnages vendus selon la destination – Chiffres FEDEREC 2021.....	21
Tableau 3-1 : Principales sources de données	27
Tableau 3-2 : Origines et tonnages des flux collectés – métaux.....	30
Tableau 3-3 : Inventaire de la collecte - métaux.....	35
Tableau 3-4 : Inventaire des étapes de tri - métaux	36
Tableau 3-5 : Inventaire des étapes de broyage, cisailage et de transports amont et aval - métaux .	37
Tableau 3-6 : Émissions calculées pour une tonne de métal broyée.....	39
Tableau 3-7 : Inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR et de production vierge – Acier.....	40
Tableau 3-8 : Inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR – Aluminium (refiner/fusion-affinage)	40
Tableau 3-9 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – Aluminium.....	41
Tableau 3-10 : Inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR – Cuivre	41
Tableau 3-11 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – Cuivre	42
Tableau 3-12 : Hypothèses et données pour l'inventaire de l'étape d'incorporation des MPR - Zinc .	42
Tableau 3-13 : Inventaire pour l'étape de production vierge évitée - Zinc.....	43
Tableau 3-14 : Inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR – Plomb	44
Tableau 3-15 : Inventaire pour l'étape de production vierge évitée – Plomb.....	44
Tableau 3-16 : Origines et tonnages des flux collectés – Verre	45
Tableau 3-17 : Inventaire de la collecte – Verre	46
Tableau 3-18 : Inventaire de la production de calcin.....	47
Tableau 3-19 : Effets de l'incorporation de calcin.....	47
Tableau 3-20 : Composition typique d'un verre d'emballage (sans calcin)	48
Tableau 3-21 : Composition typique d'un verre plat (sans calcin) – sodo-calcique.....	48
Tableau 3-22 : Origines et tonnages des flux collectés – Papier- carton	49
Tableau 3-23 : Inventaire de l'étape de collecte – Papier-Carton.....	50
Tableau 3-24 : Inventaire de l'étape de tri – Papier-Carton.....	50
Tableau 3-25 : Inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR – Carton plat et ondulé	51
Tableau 3-26 : Inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR – Papier journal.....	51
Tableau 3-27 : Inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR – Autres papiers graphiques	52

Tableau 3-28 : Inventaire pour la production vierge évitée – Carton (kraftliner).....	53
Tableau 3-29 : Type de papier dont la production est évitée	53
Tableau 3-30 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – Papier journal.....	54
Tableau 3-31 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – Pâte à papier mécanique non couchée	54
Tableau 3-32 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – Pâte à papier mécanique couchée	54
Tableau 3-33 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – Pâte à papier sans bois non-couchée	54
Tableau 3-34 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – Pâte à papier sans bois couchée.....	55
Tableau 3-35 : Origines et tonnages collectés - Plastiques	55
Tableau 3-36 : Inventaire de l'étape de préparation des MPR (en vue de l'incorporation)	57
Tableau 3-37 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PET	58
Tableau 3-38 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PEhd	58
Tableau 3-39 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PEbd	58
Tableau 3-40 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PP	58
Tableau 3-41 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PVC.....	59
Tableau 3-42 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PS.....	59
Tableau 3-43 : Inventaire pour les étapes de tri et préparation (à destination des filières)	60
Tableau 3-44 : Inventaire pour la production de 1 tonne de granulats issus de roches meubles.....	61
Tableau 3-45 : Inventaire de l'étape de collecte – Bois	62
Tableau 3-46 : Inventaire de l'étape de tri des DEA.....	62
Tableau 3-47 : Inventaire de l'étape de production de MPR - Bois	63
Tableau 3-48 : Inventaire de l'étape de production vierge évitée – Bois	64
Tableau 3-49 : Inventaire du système « collecte évitée ».....	66
Tableau 3-50 : Traitement finaux évités.....	69
Tableau 3-51 : Rendements énergétiques de l'incinération	70
Tableau 3-52 : Mix chaleur d'origine fossile (source : IEA – données 2021).....	70
Tableau 3-53 : PCI des matériaux concernés par le scénario incinération (source : Ecoinvent)	71
Tableau 3-54 : Valeurs de DOC et DOCf retenues pour l'étude	71
Tableau 3-55 : Sources de données pour déterminer la valeur de DOCf du PCR	72
Tableau 3-56 : Sources de données pour déterminer la valeur de DOCf du bois.....	72
Tableau 4-1 : Critères d'évaluation de la qualité des données	75
Tableau 4-2 : Critère d'évaluation de la cohérence méthodologique avec la présente étude.....	75
Tableau 4-3 : Critère d'évaluation de la note globale des inventaires de cycle de vie	78
Tableau 4-4 : Facteurs d'incertitude associés à la qualité des données	81
Tableau 5-1 : Utilisation de ressources énergétiques totale (en MJ/UF).....	83

Tableau 6-1 : Tonnages collectés et utilisés pour les résultats environnementaux	98
Tableau 6-2 : Résultats pour l'utilisation de ressources énergétiques totale pour les tonnages collectés par FEDEREC en 2021 (en TJ).....	100
Tableau 7-1 : Comparaison des résultats sur le changement climatique entre les deux scénarios de fin de vie évitée (FdV) et le scénario de référence (mix)	106
Tableau 7-2 : Inventaire pour l'étape d'incorporation des MPR – Aluminium (remelter/recyclage direct)	107
Tableau 7-3 : Résultats pour la filière aluminium par unité fonctionnelle selon l'inventaire utilisé à l'étape d'incorporation des MPR	107
Tableau 7-4 : Inventaire de l'étape de préparation des MPR (en vue de l'incorporation) – Plastiques vendus en France	109
Tableau 7-5 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PET	110
Tableau 7-6 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PEhd	110
Tableau 7-7 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PEbd	110
Tableau 7-8 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PP	111
Tableau 7-9 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PVC.....	111
Tableau 7-10 : Inventaire pour l'étape de production vierge évité – PS.....	111
Tableau 7-11 : Résultats (tonnages FEDEREC 2021) de la comparaison entre la modélisation de référence et la modélisation fédération SRP – Filière plastiques	112
Tableau 7-12 : Résultats pour la filière bois par unité fonctionnelle selon la proportion de chaleur biosourcée utilisée pour l'étape de séchage.....	115
Tableau 8-1 : Résultats de la mise à jour pour le changement climatique (tonnages FEDEREC 2020)	116
Tableau 8-2 : Résultats de la mise à jour pour l'utilisation des ressources fossiles (tonnages FEDEREC 2020).....	117
Tableau 8-3 : Résultats de la mise à jour pour l'utilisation des ressources minérales et métalliques (tonnages FEDEREC 2020)	117
Tableau 8-4 : Résultats de la mise à jour pour les émissions de particules (tonnages FEDEREC 2020)	117
Tableau 8-5 : Résultats de la mise à jour pour l'eutrophisation marine (tonnages FEDEREC 2020) .	118
Tableau 8-6 : Résultats de la mise à jour par filière et par unité fonctionnelle (1/2)	119
Tableau 8-7 : Résultats de la mise à jour par filière et par unité fonctionnelle (2/2)	120
Tableau 12-1 : Résultats totaux par filière pour les 16 indicateurs recommandés par la méthode PEF	131
Tableau 12-2 : Données fournies par Aktid (novembre 2015).....	136
Tableau 12-3 : Émissions dans l'air d'une installation de broyage selon la technologie de traitement employée.....	137
Tableau 12-4 : Répartition des poussières totale, PM10, PM 2.5 – Données de sites de broyage de métaux en Californie	138

11 Table des figures

Figure 1-1 : Diagramme de flux de l'analyse du cycle de vie.....	9
Figure 2-1 : Représentation simplifiée du cycle du carbone biogénique – $xx = xx' + xx''$	18
Figure 2-2 : Frontières du système.....	19
Figure 2-3 : Logigramme représentant la ligne directrice suivie pour la recherche des données du BNR 2019.....	23
Figure 3-1 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage de l'acier.....	32
Figure 3-2 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage de l'aluminium	33
Figure 3-3 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage du cuivre.....	34
Figure 3-4 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage du zinc	35
Figure 3-5 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage du plomb	35
Figure 3-6 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage du verre	45
Figure 3-7 : Origines et tonnages des flux collectés – Papier- carton	49
Figure 3-8 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage des plastiques.....	56
Figure 3-9 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage des inertes du BTP.....	59
Figure 3-10 : Étapes de cycle de vie considérées pour la filière de recyclage du bois.....	62
Figure 5-1 : Résultats totaux sur le changement climatique.....	84
Figure 5-2 : Résultats totaux pour l'utilisation de ressources fossiles	85
Figure 5-3 : Résultats par phase sur le changement climatique	86
Figure 5-4 : Résultats par phase sur l'utilisation de ressources fossile.....	87
Figure 5-5 : Résultats totaux pour l'indicateur d'utilisation des ressources minérales	89
Figure 5-6 : Résultats par phase pour l'utilisation des ressources minérales	90
Figure 5-7 : Résultats totaux pour l'indicateur d'émissions de particules	92
Figure 5-8 : Résultats par phase pour l'indicateur d'émissions de particules.....	93
Figure 5-9 : Résultats totaux sur l'eutrophisation des eaux marines.....	95
Figure 5-10 : Résultats par phase pour l'eutrophisation des eaux marines.....	96
Figure 5-11 : Résultats totaux sur l'eutrophisation des eaux douces	97
Figure 5-12 : Résultats par phase sur l'eutrophisation des eaux douces.....	97
Figure 6-1 : Contribution des filières à la catégorie d'impact changement climatique – FEDEREC 2021	98
Figure 6-2 : Contribution des filières de recyclage à l'utilisation de ressources fossiles – FEDEREC 2021	99
Figure 6-3 : Contribution des filières de recyclage à l'utilisation des ressources minérales – FEDEREC 2021.....	101
Figure 6-4 : Contribution des filières de recyclage aux émissions de particules – FEDEREC 2021	102
Figure 6-5 : Contribution des filières de recyclage à l'eutrophisation marine – FEDEREC 2021.....	103

Figure 7-1 : Résultats par phase pour le scénario de fin de vie évitée 100% incinération – Changement climatique.....	105
Figure 7-2 : Résultats par phase pour le scénario de fin de vie évitée 100% incinération – Utilisation des ressources fossiles.....	105
Figure 7-3 : Sensibilité des résultats de la filière de recyclage PP au changement climatique (CC) du scénario de substitution des MPR de PP par du béton.....	114
Figure 7-4 : Sensibilité des résultats de la filière de recyclage PP au changement climatique (CC) du scénario de substitution des MPR de PP par du bois.....	114
Figure 12-1 : Critère d'évaluation de la cohérence méthodologique avec la présente étude	133
Figure 12-2 : grille d'évaluation des inventaires de cycle de vie sur la cohérence méthodologique avec la présente étude	134
Figure 12-3 : Exemple de graphique « Range » obtenu avec RangeLCA.....	135

12 Annexes

Annexe 1. Modélisation du transport routier

Les impacts environnementaux du transport par camion comprennent :

- Les émissions liées à la production et à l'approvisionnement de carburant,
- Les émissions directes lors de la combustion du carburant,
- Les infrastructures.

Consommation de carburant et émissions directes :

La consommation de carburant et les émissions dans l'air sont déterminées avec la méthodologie COPERT 5⁴².

COPERT 5 est un outil de calcul des émissions polluantes imputables au transport routier. Il permet d'estimer les émissions des polluants majeurs (CO, NO_x, VOC, PM, NH₃, SO₂, métaux lourds) produits par les différentes catégories de véhicules (de la voiture au semi-remorque) ainsi que les émissions de gaz à effet de serre (CO₂, N₂O, CH₄).

COPERT 5 indique la consommation du camion chargé à 100%. Pour calculer la consommation réelle, on considère que deux tiers sont fixes et qu'un tiers est fonction de la masse effectivement transportée par le camion.

L'inventaire de cycle de vie utilisé pour la consommation de carburant est le suivant : « *market for diesel, low-sulfur, EU w/o CH, EI v 3.5* ».

Les normes d'émissions respectées par la flotte de camions modélisés sont réparties selon les règles suivantes :

- 11% Euro 3
- 19% Euro 4
- 28% Euro 5
- 43% Euro 6

Source : Estimation basée sur les données d'âge des véhicules en 2017 en Europe par Eurostat

La méthode COPERT 5 établit des consommations de diesel par kilomètre parcouru en fonction des voies empruntées. Une différenciation est également faite sur le lieu d'émission (densité de population faible pour les zones rurales et voies rapides et densité forte pour les zones urbaines).

Les voies empruntées par défaut par les camions modélisés sont à (hypothèse) :

- 5% en zone urbaine ;
- 15% en zone rurale ;
- 80% en voie rapide.

⁴² Destinée à être utilisée à l'échelle européenne et financée par l'European Environment Agency (EEA), cette méthodologie a été mise au point par Leonidas Ntziachristios et Zisis Samaras (*Laboratory of Applied Thermodynamics, Aristotle University of Thessaloniki, Grèce*). Copert 4 fait partie du projet ARTEMIS qui a fédéré 36 organisations (entreprises, instituts de recherche, universités) de 15 pays européens dans le but d'harmoniser les facteurs d'émissions utilisés dans les différents pays d'Europe.

Infrastructures

L'inventaire de cycle de vie des infrastructures est défini pour un camion moyen et est exprimé en v.km (véhicule x kilomètres). L'ICV est basé sur le rapport n°14 d'Ecoinvent – Transport.

Les infrastructures incluses sont la production du camion, son entretien et sa fin de vie ainsi que la fabrication des routes, leur entretien et leur fin de vie.

Cas de la collecte en porte à porte en benne à ordures ménagère

La consommation des bennes à ordures ménagères (BOM) est divisée en deux parties : roulage et collecte. En roulage, la consommation est de 40 litres/100km et pendant la collecte de 100 litres/100km. La consommation moyenne d'une BOM⁴³ en France étant de **60 litres/100 km**, la part de la distance en roulage est de 66% et la part en collecte est donc de 34%.

Les émissions des bennes à ordures ménagères sont modélisées via COPERT IV (émissions d'un camion de 10 tonnes en charge utile).

Les normes d'émissions sont réparties à 50% Euro 4 et 50% Euro 5 (hypothèse).

⁴³ « Les Bennes à ordures ménagères écologiques, quelles solutions pour les réseaux ? », ADEME, octobre 2003

Annexe 2. Résultats pour les 16 indicateurs d'impact

Tableau 12-1 : Résultats totaux par filière pour les 16 indicateurs recommandés par la méthode PEF

Filière de recyclage	Changement climatique (CC)	Épuisement de la couche d'ozone (OD)	Toxicité cancérogène (Tox_c)	Toxicité non cancérogène (Tox_nc)	Effet Respiratoire, émissions de particules (PM)	Radiations ionisantes (IR)	Formation d'ozone photochimique (POF)	Acidification (Ac)
Unité / UF	kg CO ₂ -eq.	kg CFC11-eq.	Comparative Toxic Unit for human (CTUh)	Comparative Toxic Unit for human (CTUh)	disease incidence	kBq Uranium-235-eq.	kg NMVOC-eq.	Moles H ⁺ -eq.
Métaux ferreux	-1 502	2.0E-05	5.6E-07	-1.6E-05	-5.7E-05	54	-2.3	-3.2
Cuivre	-2 059	5.8E-05	-5.1E-06	-2.6E-04	-8.2E-04	145	-11.8	-38.4
Aluminium	-5 510	-5.7E-04	-1.9E-05	-2.5E-04	-4.3E-04	-1 629	-16.5	-36.7
Plomb	-778	-3.1E-06	1.2E-03	7.2E-01	1.8E-04	-1	-4.5	-6.4
Zinc	-1 179	-7.2E-05	-1.2E-05	-2.6E-04	-5.6E-05	119	-6.5	-9.9
Papier / Carton	49	5.5E-05	-9.6E-08	-5.0E-06	-1.1E-04	29	-1.1	-0.6
Verre emballage	-679	-3.7E-05	-3.1E-07	-8.0E-06	-2.5E-05	-38	-1.1	-3.2
Verre plat	-562	-3.1E-05	-4.4E-07	-9.9E-06	-3.1E-05	-35	-1.0	-2.6
PET paillettes	-2 194	-9.3E-03	-1.1E-06	-1.5E-05	-5.3E-05	101	-4.3	-5.3
PET granules	-2 686	-1.2E-02	-1.3E-06	-2.0E-05	-6.8E-05	118	-5.4	-6.6
PEhd paillettes	-2 031	5.5E-05	-3.0E-07	-5.2E-06	-3.3E-05	178	-3.7	-3.1
PEhd granules	-1 898	5.4E-05	-2.7E-07	-4.6E-06	-3.1E-05	184	-3.4	-2.8
PEbd granules	-1 771	4.7E-05	-2.3E-07	-5.1E-06	-2.9E-05	92	-4.7	-3.1
PEbd agricole	-557	1.1E-05	-9.3E-08	-1.9E-06	-1.2E-05	9	-1.9	-1.3
PP	-2 434	5.8E-05	-2.6E-07	-5.8E-06	-4.5E-05	199	-4.2	-3.7
PS	-2 231	6.2E-05	-3.1E-07	-9.4E-06	-2.2E-05	-120	-2.5	-3.1
PVC	-1 879	-9.2E-04	-1.1E-06	-3.6E-05	-4.3E-05	-98	-3.9	-5.4
Inertes	-1	-1.4E-06	3.9E-09	-8.8E-09	-4.3E-07	2	0.0	-0.02
Bois	61	2.7E-05	-2.0E-08	-5.0E-07	-7.9E-07	86	0.1	0.49

Filière de recyclage	Eutrophisation terrestre (Eu_T)	Eutrophisation des eaux douces (Eu_F)	Eutrophisation marine (Eu_M)	Écotoxicité	Utilisation des terres (LU)	Épuisement de la Ressource en eau (WU)	Épuisement des ressources minérales (Res_m)	Utilisation des ressources fossiles (Res_f)
<i>Unité / UF</i>	<i>Moles N-eq.</i>	<i>kg P-eq.</i>	<i>kg N-eq.</i>	<i>Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)</i>	<i>dimensionless (pt)</i>	<i>Volume m3-world eq.</i>	<i>kg Sb-eq</i>	<i>Energy, MJ</i>
Métaux ferreux	-5.3	7.4E-03	-5.3E-01	1 172	1 118	-115	-2.5E-02	-12 007
Cuivre	-38.7	4.7E-01	-3.5E+00	-476 117	3 545	-2 329 823	-1.8E+00	-17 839
Aluminium	-43.6	-3.3E+00	-4.8E+00	-646 338	-4 588	-9 904	-1.2E-02	-95 647
Plomb	-18.7	-2.8E-03	-1.8E+00	1 272 506 099	-819	-3 350	-1.8E-01	-10 692
Zinc	-26.2	-2.4E+00	-2.5E+00	-1 102 891	-14 792	-1 137	-1.4E+00	-13 058
Papier / Carton	-0.7	-2.1E-01	-4.3E-03	554	-124 061	-93	5.8E-04	6 308
Verre emballage	-9.0	-1.4E-01	-3.8E-01	-29 365	-3 353	-458	-9.6E-03	-6 048
Verre plat	-7.3	-1.3E-01	-3.3E-01	-30 587	-3 052	-382	-7.5E-03	-5 414
PET paillettes	-10.9	-2.5E-01	-1.6E+00	-19 089	-1 639	-852	-2.2E-02	-34 119
PET granules	-13.7	-2.9E-01	-1.9E+00	-23 914	-2 261	-1 037	-2.7E-02	-43 157
PEhd paillettes	-5.9	-6.5E-02	-7.2E-01	-2 764	530	-609	-8.1E-03	-37 314
PEhd granules	-5.4	-3.4E-02	-6.5E-01	-2 241	619	-563	-7.5E-03	-34 982
PEbd granules	-6.1	-1.3E-01	-8.3E-01	-3 035	230	-776	-7.0E-03	-35 630
PEbd agricole	-2.3	-5.7E-02	-3.3E-01	-1 468	116	-322	-2.8E-03	-16 344
PP	-7.3	-3.7E-03	-9.2E-01	-2 425	491	-604	-9.5E-03	-49 240
PS	-6.9	1.3E-01	-8.8E-01	-31 512	795	-207	-7.3E-03	-39 923
PVC	-10.6	-4.5E-01	-1.4E+00	-58 434	-3 119	-2 238	-3.0E-02	-37 808
Inertes	-0.1	1.7E-04	-7.8E-03	-19	-262	-5	3.5E-05	-34
Bois	0.7	3.9E-02	-1.4E-01	1 249	-33 219	37	4.9E-04	4 756

Annexe 3. Évaluation de la cohérence méthodologique des inventaires de cycle de vie

Le critère de pertinence et cohérence méthodologique est basé sur le respect des 9 règles méthodologiques suivantes :

Figure 12-1 : Critère d'évaluation de la cohérence méthodologique avec la présente étude

Frontières du système et coupure du système	Les limites du système comprennent tous les processus liés à la chaîne de production et la coupure du système n'est pas réalisée à moins qu'elle soit justifiée comme négligeable sur les catégories d'impacts couvertes par l'étude
Gestion des processus multifonctionnels	La hiérarchie décisionnelle doit être suivie pour résoudre la multifonctionnalité (hiérarchie des normes ISO 14040-44) : (1) subdivision ou expansion du système ; (2) attribution fondée sur une relation physique sous-jacente pertinente (la substitution peut s'appliquer ici) ; (3) attribution fondée sur une autre relation
La base de données d'arrière-plan de l'inventaire correspond à celle de l'étude	Les données d'arrière-plan sont issues de la même base de données que celle utilisée dans l'étude (Ecolinvent v3.7.1)
Une revue critique a été réalisée ou un processus de vérification est mis en place	Une revue critique par un expert ACV indépendant a été réalisée ou une procédure de vérification a été mise en place
Nomenclature ILCD ou Ecospol	La nomenclature ILCD ou Ecospol est utilisée
Emissions et captation de carbone biogénique et fossile	Les absorptions et les émissions doivent être déclarées séparément pour les sources fossiles et les sources biogéniques.
Compensation des émissions	Ne doit pas être inclus
Mix électrique national moyen	Le mix électrique utilisé est le mix attributionnel national moyen
Inclusion des bâtiments et infrastructures	Les bâtiments et infrastructures sont prises en compte dans l'inventaire de cycle de vie

Cette évaluation de la qualité des données influence la note attribuée au critère « Pertinence et cohérence méthodologiques » de la notation de la qualité des données. Cette notation est réalisée sur base de jugement d'expert, cependant, on peut donner la règle suivante à titre indicatif :

Note relative à la qualité de données sur le critère <i>Pertinence et cohérence méthodologiques</i>	Pourcentage de critères respectés (sur 9 critères)
1	> 90 %
2	> 80 %
3	> 60 %
4	> 40 %
5	< 40 %

La grille d'évaluation des différentes sources d'inventaires de cycle de vie est présentée dans le tableau suivant :

Figure 12-2 : grille d'évaluation des inventaires de cycle de vie sur la cohérence méthodologique avec la présente étude

	Frontières du système et coupure du système	Gestion des processus multifonctionnels	La base de données d'arrière-plan de l'inventaire correspond à celle de l'étude	Une revue critique a été réalisée ou un processus de vérification est mis en place	Nomenclature ILCD (EF 2.0 ou 3.0) ou Ecospol	Mix électrique national moyen	Emissions et captation de carbone biogénique et fossile	Pas de compensation des émissions	Inclusion des bâtiments et infrastructures
Inventaire Ecoinvent	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Inventaire Copper Alliance	1	?	0	1	1	1	1	1	?
Inventaire Worldsteel	1	1	0	1	0	1	1	1	0
Inventaire ILA	1	1	0	1	1	1	1	1	0
Inventaire Coppert V	1	1	1	1	1	NR	1	1	1

La base de données d'arrière-plan de l'inventaire correspond à celle de l'étude

- Copper Alliance, Worldsteel, EAA, ILA : la base de données GABI est utilisée

Une revue critique a été réalisée

- Dans le cas d'Écoinvent, la base de données est très largement utilisée par la communauté ACV et des processus de vérification en interne sont mis en place

Mix électrique national moyen

- COPPERT V concerne uniquement les émissions directes du transport routier la consommation de carburant.

Annexe 4. Présentation du logiciel RangeLCA

Le logiciel utilisé pour calculer les résultats est RangeLCA, un outil développé par RDC Environment.

Le logiciel calcule automatiquement :

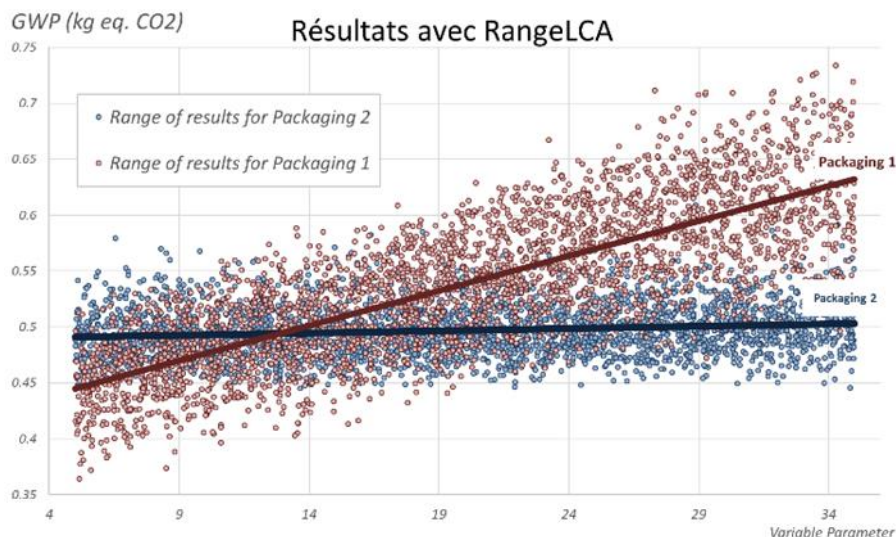
- Les résultats moyens d'impact correspondant à la moyenne des résultats obtenus pour l'ensemble des combinaisons aléatoires de paramètres ;
- Les résultats obtenus pour chacune des combinaisons de paramètres (par exemple, 1000 combinaisons) ; ces résultats peuvent être portés en graphe en fonction de la valeur d'un des paramètres variables du modèle ; ces graphes dits « Range » permettent d'évaluer la sensibilité des résultats par rapport au paramètre mis en abscisse ;
- Le classement de l'ensemble des paramètres par ordre décroissant de sensibilité du modèle ; le logiciel permet ainsi de déterminer la sensibilité des différents résultats à chaque paramètre variable du modèle, tous les autres paramètres restant variables (et non pas, classiquement, tous les autres paramètres étant fixes).

Ce type de résultats permet de s'assurer une analyse précise et complète du système étudié. En effet, le logiciel permet d'étudier un grand nombre de scénarios possibles.

En pratique, cela permet de :

- Créer des graphes « Range » pour :
 - Identifier les résultats possibles (valeurs minimum et maximum) ;
 - Évaluer la probabilité des scénarios étudiés ;
 - Exprimer sous forme de graphes, la sensibilité des résultats pour un paramètre précis (pente de droite de régression linéaire).
- Déterminer tous les liens de causalité entre les variables du modèle ;
- Identifier le point critique (ou zone critique) d'inversion des conclusions ;
- Identifier la liste des paramètres les plus sensibles (automatiquement calculés par le logiciel).

Figure 12-3 : Exemple de graphique « Range » obtenu avec RangeLCA



Les clés d'interprétation des résultats sont les suivantes :

- Chaque point correspond à un résultat pour un ensemble spécifique de paramètres fixes. Ainsi, tous les résultats correspondant à tous les paramètres potentiels de combinaison de variables du modèle sont représentés sur cette figure ;

- Plus la ligne de tendance est raide, plus les résultats sont sensibles au paramètre présenté sur l'axe de la coordonnée X ;

Le degré de dispersion verticale (largeur de la bande de points) correspond directement à l'importance relative de la variabilité résiduelle.

Annexe 5. Données utilisées pour le calcul de la consommation de la filière granulats

Les données suivantes ont été utilisées pour le calcul de la consommation électrique de la transformation des déchets de chantier en granulats.

Tableau 12-2 : Données fournies par Aktid (novembre 2015)

Paramètre	Valeur	Unité	Commentaire
Heures de travail annuelles	1750	h	
Débit horaire	40	t/h	
Procédé			
Puissance installée	170	kW	Donnée en entrée
% utilisé de la puissance	85	%	80% à 90%
Groupe climatisation froid/chauffage			
Puissance installée	145	kW	
% utilisé de la puissance	60	%	Selon les saisons la variation est importante, entre 10 et 100% de puissance consommée. Une moyenne de 50 à 70% peut être considérée

Annexe 6. Les émissions dans l'air d'une installation de broyage

Tableau 12-3 : Émissions dans l'air d'une installation de broyage selon la technologie de traitement employée

	Source	Cyclone et laveur humide (<i>wet scrubber</i>)			Cyclone et Filtre à manches			Cyclone et laveur venturi		
		min	médiane	max	min	médiane	max	min	médiane	max
capacité broyeur (t/jour)	[1]	200	650	1 100	70	2 115	4 160	250	955	1 660
flux d'air (Nm ³ /h)	[1]	30 000	58 500	87 000	9 300	28 150	47 000	21 000	60 500	100 000
durée de fonctionnement du broyeur (h/jour)	[2]	8	10	12	8	10	12	8	10	12
Poussières totales (mg / Nm ³)	[1]	2.7	4.1	5.5	0.1	2.55	5	0.1	6.45	12.8
Ni (mg / Nm ³)	[1]	0.004	1.202	2.4		0.8				
Pb (mg / Nm ³)	[1]	0.002	0.011	0.02		0.006			0.0044	
Cd (mg / Nm ³)	[1]	0.00004	0.00052	0.001					0.0003	
As (mg / Nm ³)	[1]									
Cu (mg / Nm ³)	[1]		0.02			0.12		0.002	0.005	0.008
Zn (mg / Nm ³)	[1]									

[1] : Chapitre 3.1.2.1.2 – Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Treatment, JRC, 2018

[2] : Hypothèse

Tableau 12-4 : Répartition des poussières totale, PM10, PM 2.5 – Données de sites de broyage de métaux en Californie

Nom du site	Sims Metal Management	Schnitzer Steel Products	SA Terminal Island	SA Bakersfield	SA Anaheim
Capacité maximale	200 tonnes / heure	720 000 tonnes/an	108 333 tonnes/mois	2 300 tonnes/jour	56 160 tonnes / mois
Technologie de traitement de l'air	Cyclone + laveur humide	Cyclone + laveur humide	laveur humide	Laveur humide	Laveur humide
Dust	8.6	0.4	2	0.5	1.4
PM 10	5.4	0.2	0.4	0.3	0.3
PM 2.5	4.1	0.2	0.3	0.2	0.2

Calcul de la répartition des poussières

Moyenne

PM > 10	37.2%	50.0%	80.0%	40.0%	78.6%	57.2%
PM 2.5 - 10	15.1%	0.0%	5.0%	20.0%	7.1%	9.5%
PM 2.5	48%	50%	15%	40%	14%	33.4%
total	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Source: DEPARTMENT OF TOXIC SUBSTANCES CONTROL (California) - Evaluation and Analysis of Metal Shredding Facilities and Metal Shredder Wastes - August 2021



EXPERTS ET SOLUTIONS EN DÉVELOPPEMENT DURABLE
rdcenvironment.be - contact@rdcenvironment.be

Adresse

Av. Gustave Demey, 57
1160 Bruxelles, Belgique

Téléphone

+32 2 420 28 23

Web Online

contact@rdcenvironment.be

www.rdcenvironment.be