

ACHAT DE PRODUITS CONTENANT DU RECYCLE : QUELLE PERTINENCE EN TERMES D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ?

RAPPORT FINAL Février 2024

Responsables scientifiques

Aurélie PERRIN, Pauline Fabre,
Maixent Tignon, Robin Sales (EVEA)

Sébastien Willerval (Omega Pack)



L'association SCORE LCA est une structure d'étude et de recherche dédiée aux travaux relatifs à l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) et à la quantification environnementale. Elle vise à promouvoir et à organiser la collaboration entre entreprises, institutionnels et scientifiques afin de favoriser une évolution partagée et reconnue, aux niveaux européen et international, de la méthode d'Analyse du Cycle de Vie et de sa mise en pratique.

- ✓ En Bibliographie, ce document sera cité sous la référence :
SCORE LCA, Achat de produits contenant du recyclé : quelle pertinence en termes d'impact environnemental ? 2023, 122 pages, n°05-2022.

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

- ✓ Les points de vue et recommandations exprimés dans ce document n'engagent que les auteurs et ne traduisent pas nécessairement, sauf mention contraire, l'opinion de l'ensemble des membres de SCORE LCA.

- ✓ Les informations et les conclusions présentées dans le présent document ont été établies au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

SCORE LCA is an association that has been created to financially support collaborative research on LCA and related topics. It aims to promote and organize cooperation between companies, institutional and scientists in order to support the evolution of LCA methods and its practical implementation at European and international level.

- ✓ This work has been supported by ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) www.ademe.fr

- ✓ The views and recommendations expressed in this publication are those of the authors and do not necessarily reflect, unless otherwise stated, the views of all members of SCORE LCA.

- ✓ The information and conclusions presented in this document were established on the basis of scientific and technical data and regulatory and normative framework in force at the date of the publication of documents.

RESUME

L'augmentation conjointe des flux de matières recyclées et des incitations réglementaires poussent les fabricants à intégrer ces matières dans leurs produits.

En effet, le recyclage semble à première vue ne présenter que des bénéfices environnementaux : en transformant les déchets en ressources, il permet de réduire la pollution causée par ces dernières, et d'économiser de la matière en diminuant de ce fait la pression sur celles qui ne sont pas ou faiblement renouvelables.

Cependant, cette analyse doit être nuancée au regard de plusieurs critères techniques et économiques impactant les performances environnementales des procédés, tels que les techniques de recyclage utilisés, plus ou moins complexes et rentables, la qualité des matières utilisées pour le recyclage et de celles obtenues à l'issue du procédé et la logistique associée à la collecte et transformation.

L'objectif de cette étude, portant plus particulièrement sur les matières plastiques, le béton, l'acier et le verre creux, est de fournir des outils permettant de guider les fabricants et acheteurs de produits incorporant de la matière recyclée, dans l'identification des critères risquant de conduire à un impact supérieur par rapport à un produit composé à 100% de matériaux vierge.

Ces outils ont notamment été développés à travers l'analyse de la prise en compte du recyclage dans les normes et cadres réglementaires en vigueur, et la caractérisation des marchés visés. Ils permettent également d'identifier les situations de vigilance où une analyse approfondie doit être menée pour prendre une décision, via notamment les techniques d'ACV et/ou d'empreinte projet.

MOTS CLES

Acier ; Analyse de cycle de vie / ACV ; béton ; Circular Footprint Formula (CFF) ; Cut-Off plus crédits ; Cut-Off ; économie circulaire ; empreinte projet ; fin de vie ; impact environnemental ; labels ; matière recyclée ; matières plastiques ; modélisation ; performance environnementale ; recyclage ; verre

SUMMARY

A combination of increasing flows of recycled materials and regulatory incentives is driving manufacturers to incorporate these materials into their products.

At first glance, recycling seems to only offer environmental benefits: by transforming waste into resources, it reduces the pollution caused by the latter, and saves materials while at the same time reducing the pressure on those that are not, or only marginally, renewable.

However, this analysis needs to be enlightened by several technical and economic criteria influencing the environmental performance of the processes, such as the recycling techniques used, which may be complex, the quality of the materials used for recycling and those obtained from the process and, the logistic linked to waste collection and transformation processes.

The aim of this study, covering more specifically plastics, concrete, steel and glass, is to provide tools to guide manufacturers and purchasers of products incorporating recycled materials, in identifying the criteria likely to lead to a higher impact than a product made from 100% virgin materials.

These tools have been developed through an analysis of how recycling is addressed in current standards and regulatory frameworks, and a characterization of target markets. They can also be used to identify situations where an in-depth analysis is required before a decision can be taken, using LCA and/or project footprint techniques.

KEY WORDS

Circular economy ; Circular Footprint Formula (CFF) ; concrete ; Cut-Off ; Cut-Off plus credits ; end-of-life ; environmental impact ; environmental performance footprint project ; glass ; labels ; Life cycle assessment / LCA ; modeling ; plastics ; recycled material ; recycling ; steel

TABLE DES MATIERES

ACRONYMES	7
LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX	8
1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	11
1.1 Contexte	11
1.2 Objectifs de l'étude	11
1.3 Définitions	12
2. LES METHODOLOGIES DE PRISE EN COMPTE DE L'INTEGRATION DE MATIERES RECYCLEES EN EVALUATION ENVIRONNEMENTALE OU APPROCHE METHODOLOGIQUE.....	14
2.1 Moyens mis en œuvre pour la revue bibliographique	14
2.1.1 Sélection des approches à développer	14
2.1.2 Formalismes graphiques	14
2.1.3 Les critères d'évaluation	16
2.2 Analyse comparative de 4 méthodologies de modélisation des matériaux recyclés ..	19
2.2.1 Cut-off	19
2.2.2 Cut-off avec crédits (EN15804).....	23
2.2.3 Circular footprint formula (CFF)	30
2.2.4 APOS (allocation at point of substitution).....	35
2.3 Analyse des approches non ACV.....	36
2.3.1 Les labels environnementaux et normes relatives au recyclage	36
2.3.2 Dans la méthode empreinte projets	47
2.4 Identification des paramètres clés influençant les performances environnementales ..	50
2.4.1 Taux de matière recyclé	52
2.4.2 Impact du recyclage	52
2.4.3 Taux de substitution	52
2.4.4 Tension sur l'offre et la demande.....	53
2.4.5 Impacts évités	53
2.2.5 Illustration de l'influence des méthodes de modélisation sur les résultats ACV.....	54
3. ANALYSE SECTORIELLE	55
3.1 Présentation des flux par matériau.....	55
3.1.1 Types de gisements	55
3.1.2 Tentative de quantification des flux.....	57
3.1.3 Système de collecte collective	62
3.1.4 Types de produits incorporant de la matière recyclée	63
3.1.5 Demande de matières secondaires	64

3.1.6	Importation de matières secondaires	66
3.2	Description des filières de recyclage par matériau	68
3.2.1	Accessibilité de la matière recyclée	68
3.2.2	Etapes principales et point de substitution	69
3.2.3	Aspects logistiques.....	71
3.2.4	Facteurs techniques à incidence environnementale	72
3.3	Enjeux environnementaux des filières de recyclage.....	78
3.3.1	Analyse du poids des étapes des filières	78
3.3.2	Efficacité logistique des filières	78
3.3.3	Principaux indicateurs concernés	79
3.4	Critères techniques à considérer.....	79
3.4.1	Critères relatifs au matériau.....	79
3.4.2	Critères relatifs à la filière	80
3.4.3	Critères relatifs au produit.....	80
3.5	Illustration par des cas d'école de recyclage secondaire.....	81
3.5.1	Plastiques.....	81
3.5.2	Métaux (acier)	82
3.5.3	Verre creux.....	82
3.6	Tentative de guidage à partir de seuils quantitatifs.....	83
3.6.1	Méthodologie employée pour la détermination des seuils.....	83
3.6.2	Application aux différents matériaux	84
3.6.3	Intégration de l'approche sectorielle	88
4.	RECOMMANDATIONS DE CRITERES PERMETTANT DE GUIDER L'ACHAT DE PRODUITS CONTENANT DU RECYCLE	91
4.1	Présentation de la grille de critères	91
(1)	Pourcentage de matière recyclée incorporée :	93
(2)	Procédés et logistiques	93
(3)	Taux de substitution et qualité de la matière	94
(4)	Rapport entre offre et demande	94
(5)	Impacts évités (sections 2.2).....	95
(6)	Influence sur la conception du produit suivant.....	95
4.2	Qualification des situations favorables et défavorables par matériau	96
4.3	Application à deux cas d'étude.....	100
4.3.1	Cas d'étude : plastique	100
4.3.2	Cas d'étude : acier.....	102
5.	CONCLUSIONS	105

ANNEXES	106
Annexe 1 : Liste des publications consultées	106
Annexe 2 : Liste des personnes consultées	107
Annexe 3-A : Organigramme de la filière de recyclage des matières plastiques	108
Annexe 3-B : Organigramme de la filière de recyclage de l'acier	109
Annexe 3-C : Organigramme de la filière de recyclage du verre creux.....	110
Annexe 3-D : Organigramme de la filière de recyclage du BETON	111
Annexe 4 : Etablissement des fourchettes de seuils d'incorporation selon les contraintes environnementales	112
Annexe 5 : Impacts évités du recyclage : ratio impact matière vierge / matière recyclée.	113
Annexe 6 : Mise en œuvre des approches ACV sur un exemple (plastique)	114
Annexe 7 : Construction d'un arbre des conséquences grâce à la méthode empreinte projet – exemple d'un atelier de recyclage de fenêtres	121

ACRONYMES

2EC : Engagement Economie Circulaire construction et aménagement

ACV : Analyse du Cycle de Vie

APOS : Allocation at the point of substitution

APUR : Association des Producteurs et Utilisateurs de papiers Recyclés

BDD : Base de données

BREEAM : Building Research Establishment Environmental Assessment Method

Cerema : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

CFF : Circular Footprint Formula

CSC : Concrete Sustainability Council

D3E : Déchet d'Equipement Electrique et Electronique

DEP : Déclaration Environnementale Produits

DGNB : Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen

FDES : Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire

FDV : Fin de vie

Filière REP : filière à Responsabilité Elargie des Producteurs

FSC : Forest Stewardship Council

MFI : indice de fluidité

MPR : matières premières de recyclage

MTD : Maximum Tolerated Dose

PEF : Product Environmental Footprint

PEFC : Programme de Reconnaissance des Certifications Forestières

REACH : Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals

RFB : retardateurs de flamme bromés

RSE : Responsabilité Sociétale des entreprises

VHU : Véhicules Hors d'Usage

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1 : Stratégie de gestion des déchets.....	12
Figure 2 : Cas d'étude générique d'un matériau qui, par le biais du recyclage, est utilisé dans trois produits différents. Le flux de ce matériau est indiqué par les boîtes et flèches vertes. Le gris indique les processus et les flux qui n'ont pas lieu grâce au recyclage. Les lettres sont expliquées ci-dessous.	15
Figure 3 : Réappropriation et sélection des critères d'analyses des méthodologies.....	18
Figure 4 : La méthode Cut-Off comme spécifié dans les systèmes EPD. En bleu la frontière entre les produits premier, dernier et intermédiaire.....	20
Figure 5 : Résultats pour la méthode Cut-Off appliquée au cas générique	21
Figure 6 : La frontière entre deux cycles de vie selon la norme EN 15804.....	25
Figure 7 : La méthode Cut-Off plus crédit avec le module D comme spécifié dans l'EN15804. En bleu la frontière entre les différents produits qui se situe au point où la matière sort de son statut de déchet.....	26
Figure 8 : Résultats pour la méthode Cut-Off plus crédit appliquée au cas hypothétique.....	27
Figure 9 : Représentation schématique de la logique de la CFF.....	31
Figure 10 : La méthode CFF. En bleu la frontière entre les produits premier, dernier et intermédiaire	32
Figure 11 : Résultats pour la méthode CFF appliqués au cas hypothétique en prenant $A=0,2$	32
Figure 12 : Représentation du changement de point de vue opéré par la méthode APOS (extrait du site d'ecoinvent).....	36
Figure 13 Exemple d'évaluation de l'impact GES d'un projet par rapport au scénario de référence avec la méthode empreinte projet.....	47
Figure 14 Les différents niveaux d'approches de la méthode empreinte projet.....	48
Figure 15 Les conclusions possibles en fonction du niveau d'approche utilisée pour la mesure de l'empreinte d'un projet	48
Figure 16 Etapes pour une analyse d'empreinte projet.....	49
Figure 17 Les principaux paramètres pour évaluer l'impact de l'intégration de matières recyclées dans un produit.....	51
Figure 18 : Composition pondérale du gisement des déchets recyclables au niveau EU (Source : EEA)	57
Figure 19 : Evolution récente des quantités de produits au niveau EU (Source : EEA).....	58
Figure 20 : Evolution de la production de déchets ménagers dans l'UE (Source : EEA).....	59
Figure 21 : flux potentiels de déchets recyclables pour les bétons – base 2014 (SOeS, CERC, UNICEM) (Source Rapport RECYBETON).....	61
Figure 22 : Taux d'utilisation des matériaux recyclables par pays en 2010 et 2021	62
Figure 23 : Taux de circularité par rapport à la consommation de matière (Source : EEA) ...	64
Figure 24 : Demande de matières plastiques recyclées par rapport à la collecte de déchets plastiques (Source : EEA)	65
Figure 25 : Importation et exportation de matières recyclées depuis l'extérieur de l'UE (Source : Eurostat)	67
Figure 26 : Tonnages importés par matériau dans l'UE (en tonnes par an) (Source : Eurostat)	67
Figure 27 : localisation des plate-formes de recyclage sur le territoire national (Source : rapport RECYBETON ²⁴)	69
Figure 28 calcul du ratio (R) pour le critère 5.1 de la grille de critères	113

Figure 29 Résultats ACV pour une bouteille de 100g sur le changement climatique avec la méthodologie CFF, Cut-Off et Cut-Off avec crédit	118
Figure 30 Résultats ACV pour une bouteille de 100g sur le changement climatique avec la méthodologie CFF, Cut-Off et Cut-Off avec crédit avec $R1=25%$, $R1=50%$ et $R1=75%$	119
Figure 31 Arbre des conséquences de l'atelier de recyclage de fenêtres étudié	121
Figure 32 Analyse d'impacts environnementaux de la mise en place de l'atelier de recyclage de fenêtres	122

Tableau 1 : Les méthodes pour la modélisation du recyclage en ACV détaillées dans ce rapport	14
Tableau 2 : Valeurs et signification des données fictives utilisées pour le cas hypothétique présenté Figure 2	15
Tableau 3 : Description des 10 critères proposés dans le rapport Ekvall	17
Tableau 4 : Description des critères d'analyses après adaptation.....	19
Tableau 5 : Grille d'évaluation de la méthode Cut-off	22
Tableau 6 : Etapes du cycle de vie et modules selon l'EN15804	24
Tableau 7 : Grille d'évaluation de la méthode Cut-off + crédit.....	29
Tableau 8 : Grille d'évaluation de la méthode CFF	34
Tableau 9 : Grille d'analyse du fonctionnement des labels sélectionnés.....	42
Tableau 10 : Grille d'analyse de la pertinence des critères environnementaux des labels sélectionnés :	44
Tableau 11 : Grille d'analyse du niveau d'exigence des critères environnementaux des labels sélectionnés	45
Tableau 12 : Description des filières de recyclage par matériaux pour la France.....	55
Tableau 13 : Cartographie des applications incorporant de la matière recyclée par secteur.....	63
Tableau 14 : Etablissement des fourchettes de seuils d'incorporation selon les contraintes environnementales (grille complète en ANNEXE 4 : Etablissement des fourchettes de seuils d'incorporation selon les contraintes environnementales).....	86
Tableau 15 Classes de taux de substitution de granulats recyclés dans les bétons (source : NF EN 206+A2/CN).....	87
Tableau 16 Pourcentage massique maximum pour les granulats recyclés de type 1&2 et le sable recyclé (Source : NF EN 206+A2/CN).....	88
Tableau 17 : Cartographie sectorielle avec couleur selon le niveau idéal du taux d'incorporation.....	89
Tableau 18 : Présentation de la structure de la grille	92
Tableau 19 : Grille appliquée au plastique.....	96
Tableau 20 Paramètres génériques utilisés pour la modélisation de l'exemple.....	114
Tableau 21 Hypothèses et schématisation de la modélisation pour chaque méthodologie	117
Tableau 22 grille d'analyse de l'influence de R1 pour une même méthodologie	119
Tableau 23 grille d'analyse de l'influence de la méthodologie pour un même R1	120
Tableau 24 bénéfices environnementaux selon les catégories d'impacts étudiées.....	122

1. Contexte et problématique

1.1 Contexte

La transformation des déchets en ressources est une composante essentielle de l'économie circulaire. La directive européenne n°98/2008 CE sur la gestion des déchets instaure notamment la hiérarchie des modes de traitement des déchets à partir du principe de priorité « réduire, réemployer, recycler ». La directive (UE) 2018/851 modifie la directive 2008/98/CE en incluant notamment des propositions de révision des directives relatives aux déchets, fixant un objectif de recyclage de 60 % des déchets municipaux et de 70 % des déchets d'emballage à horizon 2030. En France, des mesures concrètes ont été proposées en 2018 dans la « feuille de route économie circulaire », ces mesures impliquant particulièrement les entreprises dans l'axe « mieux produire ». Ces mesures ont notamment abouti au lancement début 2019 de projets structurants du contrat de la filière Transformation et valorisation des déchets, notamment les projets « Développer et soutenir l'incorporation de matières premières de recyclage dans les produits finis ». On observe donc de manière concomitante une accélération des réglementations pour la mise en œuvre du recyclage et l'utilisation de matière recyclée.

Pour que les déchets deviennent des ressources, il faut les trier et les collecter. Certains sont ensuite traités pour éviter tout risque de pollution. Tous ces déchets entrent alors dans le processus de recyclage et de valorisation. D'après le code de l'environnement le terme de recyclage peut être appliqué à : « toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Les opérations de valorisation énergétique des déchets, celles relatives à la conversion des déchets en combustible et les opérations de remblaiement ne peuvent pas être qualifiées d'opération de recyclage. » (Article L. 541-1-1 du code de l'environnement). Pour qu'une matière soit considérée comme recyclable il est donc nécessaire que les matières utilisées soient effectivement traitées dans des filières de collecte organisées, que l'état des lieux des techniques industrielles permette l'extraction du produit ou du composant en vue de son recyclage effectif et enfin que le matériau recyclé trouve un marché, compte tenu de ses caractéristiques techniques et de son prix.

Du fait de son recyclage en fin de vie, un matériau peut participer à plusieurs cycles de vie successifs : la question de l'allocation des impacts de la production primaire et du recyclage de cette matière aux cycles de vie successifs se pose donc. Plusieurs approches relevant de la méthodologie Analyse du Cycle de Vie (ACV) permettent de répartir ces impacts sur la chaîne de valeur, selon des critères d'ordre physique, économique ou politique. Selon l'approche il est alors plus ou moins intéressant pour un fabricant d'intégrer des matériaux recyclés, et de facto, plus ou moins intéressant pour ceux-ci de générer des matières recyclables. De plus, la diversité des filières de recyclage et les contraintes techniques et économiques de leur mise en œuvre conduisent à des performances environnementales de ces matériaux recyclés variables, pas toujours prises en compte dans les approches de quantification des impacts.

En conclusion, l'augmentation des flux de matières recyclées et les incitations réglementaires poussent les fabricants à intégrer des matières recyclées dans leurs produits. Or, la complexité des enjeux techniques, économiques et environnementaux rend difficile la prise de décision sur le sujet de l'utilisation de matières recyclées. Ce rapport a pour objectif de proposer des critères de décision basés sur l'état des connaissances sur les problématiques soulevées précédemment.

1.2 Objectifs de l'étude

Dans le contexte présenté en section 1.1 Contexte, l'objectif de cette étude est **d'établir des critères d'achat permettant d'expliquer pourquoi et quand l'achat de produits recyclés est ou n'est pas bénéfique pour l'environnement**. Pour atteindre cet objectif, un plan de travail en trois axes a été mis en œuvre :

1. Le premier axe cible l'analyse de la prise en compte du recyclage dans les normes et cadres réglementaires en vigueur. Ainsi, les divergences méthodologiques pour traiter l'utilisation de matière recyclée en ACV ont été identifiées et leurs conséquences sur les performances environnementales des produits contenant du recyclé ont été décrites.

2. Le second axe cible la caractérisation du marché (origine, volumes et qualité des matières recyclées) par une analyse macroscopique par matière (métaux, verre, béton, plastiques), ainsi que la caractérisation de la qualité de la matière recyclée pour une intégration dans les produits, par matière et par process de recyclage.

Les flux de matières recyclées, les processus de recyclage associés et les enjeux de qualité de ces matières ont été évalués par famille de matière (métaux dont acier, plastiques, verre et béton) afin de comprendre pour quelles catégories de produits le recours à une matière recyclée est plus vertueux que l'utilisation d'une matière vierge.

3. Enfin, le troisième axe cible la définition des critères d'achat sur les produits contenant de la matière recyclée, en établissant une liste nécessaire et suffisante de critères permettant de guider l'achat de produits contenant du recyclé, garantissant un plus haut niveau de performance environnementale du produit par rapport à sa version en matière 100% vierge.

Le rapport ci-dessous reprend ces trois axes en définissant les méthodologies et les résultats obtenus à chaque étape.

1.3 Définitions

Recyclage¹ : « toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont retraités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale ou à d'autres fins. Les opérations de valorisation énergétique des déchets, celles relatives à la conversion des déchets en combustible et les opérations de remblaiement ne peuvent pas être qualifiées d'opération de recyclage. » (Figure 1)

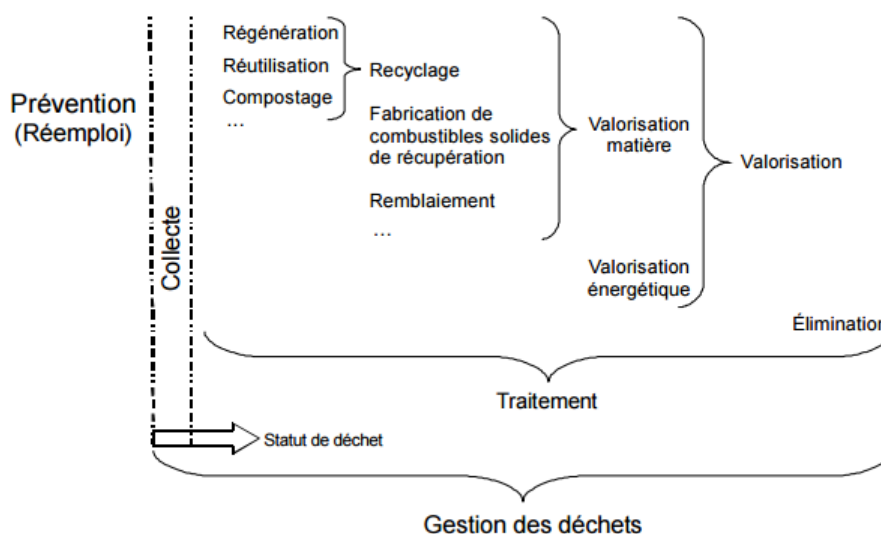


Figure 1 : Stratégie de gestion des déchets

La définition de « **contenu recyclé** » est internationalement reconnue et donnée par la norme ISO 14021 : 2016² : « *Pourcentage en masse de matériaux recyclés dans un produit ou un emballage. Seuls les matériaux de pré-et post-consommation sont considérés comme du contenu recyclé* ».

¹ Gestion et différents modes de gestion définis à l'article L.541-1-1 du Code de l'Environnement

² ISO 14021 : 2016. Marquage et déclarations environnementaux – Autodéclarations environnementales (Étiquetage de type II)

- **Matériau pré-consommateur** : Détourné du flux de déchets pendant un procédé de fabrication. Est exclue la réutilisation de matériaux tels que ceux issus du retraitement, du rebroyage ou les résidus générés pendant un procédé donné et pouvant être récupérés au sein de ce même procédé qui les a générés.
- **Matériau post-consommateur** : Généré par les ménages ou par les installations commerciales, industrielles ou institutionnelles dans leur rôle d'utilisateur final du produit qui ne peut plus servir à l'usage pour lequel il a été conçu. Ceci comprend les retours de matériaux de la chaîne de distribution.

2. Les méthodologies de prise en compte de l'intégration de matières recyclées en évaluation environnementale ou Approche méthodologique

2.1 Moyens mis en œuvre pour la revue bibliographique

2.1.1 Sélection des approches à développer

Cette partie présente les méthodes les plus utilisées pour la modélisation du recyclage en ACV (voir *Tableau 1*). Les méthodes sont issues de normes, de directives et de publications scientifiques.

Un rapport datant de mai 2020 intitulé « *Modeling recycling in life cycle assessment* »³ dirigé par l'Institut suédois de recherche sur l'environnement (Swedish Environmental Research Institute) et le centre suédois de cycle de vie (Swedish Life Cycle Center) répond en partie au premier objectif de cette étude. En effet, une revue des différentes méthodologies est proposée et une évaluation des méthodologies est réalisée suivant plusieurs critères définis. Compte tenu de la contiguïté des approches, le rapport Ekvall (nous utiliserons cette dénomination dans la suite du document) a donc servi de base de travail pour l'élaboration de cette partie.

Parmi les 12 méthodes présentées dans le rapport Ekvall, nous avons retenu dans cette étude 4 méthodes pour une analyse comparative. Cette sélection a été guidée par les critères suivants :

- Le niveau de diffusion de la méthode chez les praticiens ACV, qui découle souvent des deux critères suivants ;
- La compatibilité avec les bases de données existantes ;
- La conformité des méthodes avec les cadres réglementaires et institutionnels.

Tableau 1 : Les méthodes pour la modélisation du recyclage en ACV détaillées dans ce rapport

Méthode	Autre nom	Recommandé par
Cut-Off	Approche contenu en recyclé Méthode 100/0	International EPD system PAS 2050 Greenhouse Gas Protocol Ecoinvent
Cut-Off plus crédits	Module D	ISO 21930:2017 EN 15804+A2 :2019 16970:2016 EN16485:2014
Circular Footprint Formula (CFF)	-	Product Environmental Footprint Guide
Allocation at the point of substitution (APOS)	-	Ecoinvent

2.1.2 Formalismes graphiques

Pour illustrer les méthodes de modélisation du recyclage en ACV, une représentation schématique sera utilisée dans chaque situation (Figure 2). Afin de couvrir l'ensemble des subtilités liées à l'utilisation d'une méthode, un cas générique a été utilisé pour présenter la répartition des impacts selon les produits définis dans la *Figure 2* :

³ Ekvall et al. 2020. *Modeling recycling in life cycle assessment*.
https://www.researchgate.net/publication/344364006_Modeling_recycling_in_life_cycle_assessment

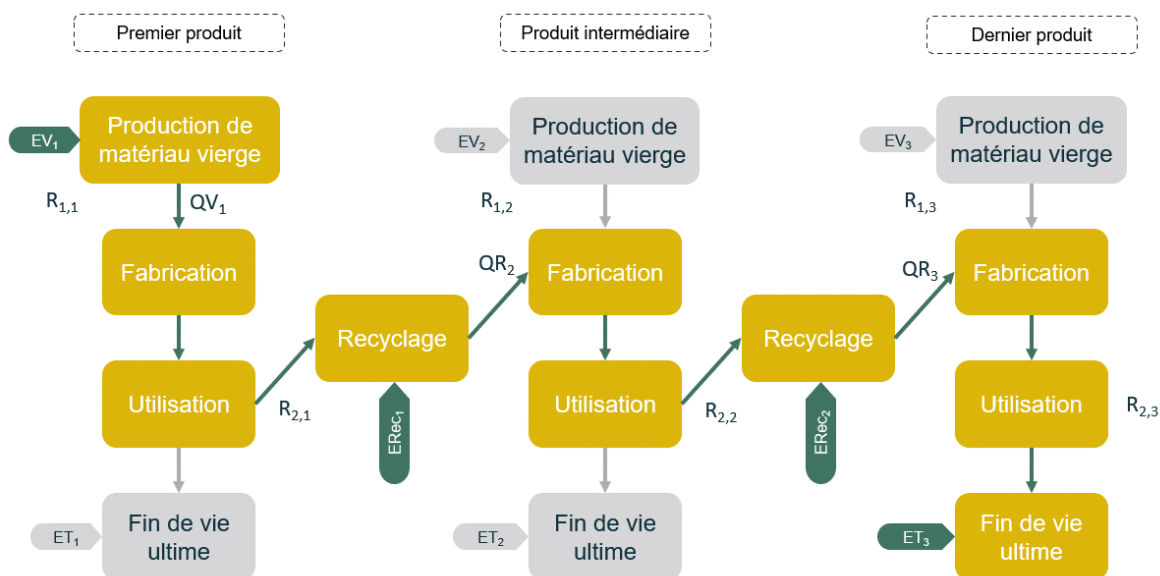


Figure 2 : Cas d'étude générique d'un matériau qui, par le biais du recyclage, est utilisé dans trois produits différents. Le flux de ce matériau est indiqué par les boîtes et flèches vertes. Le gris indique les processus et les flux qui n'ont pas lieu grâce au recyclage. Les lettres sont expliquées ci-dessous.

Ce cas générique représente de manière très simplifiée l'ensemble des cas de figure qui peuvent apparaître lors de la modélisation de cycles de vie contenant du recyclage : intégration de matière recyclée, recyclage de matière et fin de vie ultime. Il décrit un matériau qui est fabriqué pour le **produit 1** puis qui est intégralement recyclé pour être utilisé dans le **produit 2** (sans ajout de matière vierge) pour être finalement recyclé à nouveau pour un **produit 3** qui ne sera pas recyclé après utilisation et envoyé vers une fin de vie ultime.

Afin d'illustrer au mieux les différences entre les méthodologies, des valeurs fictives d'impact de recyclage, de production de matière et d'élimination des déchets sont prises pour chacun des trois produits. Elles sont extraites du rapport Ekvall mais demeurent purement empiriques. Ces valeurs fictives et leurs significations sont renseignées dans le *Tableau 2* ci-dessous :

Tableau 2 : Valeurs et signification des données fictives utilisées pour le cas hypothétique présenté Figure 2

Donnée	Valeur	Signification
EV₁	12	Impact environnemental de la production du matériau vierge du produit 1 par unité d'analyse
EV₂	12	Impact environnemental de la production du matériau vierge du produit 2 par unité d'analyse
EV₃	12	Impact environnemental de la production du matériau vierge du produit 3 par unité d'analyse
avec EV₁=EV₂=EV₃		
ERec₁	4	Impact environnemental du procédé de recyclage 1 par unité d'analyse
ERec₂	4	Impact environnemental du procédé de recyclage 2 par unité d'analyse
avec ERec₁=ERec₂		
ET₁	6	Impact environnemental du traitement en fin de vie du produit 1 par unité d'analyse
ET₂	6	Impact environnemental du traitement en fin de vie du produit 2 par unité d'analyse
ET₃	6	Impact environnemental du traitement en fin de vie du produit 3 par unité d'analyse
Avec ET₁=ET₂=ET₃		
R_{1,1}	0	Taux d'incorporation du premier produit en recyclé

R_{2,1}	1	Taux de mise à disposition du recyclage du premier produit
R_{1,2}	1	Taux d'incorporation du produit intermédiaire en recyclé
R_{2,2}	1	Taux de mise à disposition du recyclage du produit intermédiaire
R_{1,3}	1	Taux d'incorporation du dernier produit en recyclé
R_{2,3}	0	Taux de mise à disposition du recyclage du dernier produit
QV₁	1	Qualité du matériau issu de la production vierge du produit 1
QR₂	0.75	Qualité du matériau issu du recyclage pour le produit 2
QR₃	0.5	Qualité du matériau issu du recyclage pour le produit 3

Les valeurs sont sans unité pour souligner le fait qu'ils soient fictifs. Dans une application réelle des méthodes, ces valeurs correspondent à des émissions ou des impacts environnementaux (par exemple des kg CO₂ eq).

2.1.3 Les critères d'évaluation

En plus de réaliser une revue des principales méthodes d'allocation en Analyse de Cycle de Vie, le rapport Ekvall présente une liste de critères afin d'évaluer ces méthodes. Elle se base sur une revue de littérature des critères d'évaluation existants ainsi qu'une analyse critique. L'objectif sous-jacent de ces critères est de définir une 'bonne' méthode d'allocation c'est-à-dire une méthode qui permet de discriminer les solutions contribuant à une réduction de l'impact environnemental global du produit sur son cycle de vie. Il ressort une liste de 10 critères (*Tableau 3*) permettant d'évaluer soit la façon dont la méthode est définie ou construite, soit comment elle est perçue par les utilisateurs.

Les auteurs précisent qu'ils ont cherché à être les plus transparents et les plus rigoureux possible dans la définition des critères et l'évaluation des méthodes. Pour autant, une part de subjectivité demeure dans les jugements qui ont pu être fait. Ils précisent aussi que la même analyse, conduite sous un angle différent, par exemple à destination de décisionnaires, déboucherait sûrement sur des résultats différents.

Tableau 3 : Description des 10 critères proposés dans le rapport Ekvall

Critères	Description
Facilité d'utilisation	La méthode est perçue par les utilisateurs comme facile à utiliser. Elle ne présente pas de haut niveau de complexité sur le plan théorique.
Accessibilité des données	Les données nécessaires pour appliquer la méthode sont facilement accessibles (par exemple les valeurs par défaut sont fournies avec la méthode d'allocation).
Aptitude à produire des résultats généralisables	La méthode est conçue de telle sorte que les résultats obtenus s'appliquent de manière égale, même dans des cas spécifiques différents.
Aptitude à refléter les caractéristiques décisives du système d'un point de vue environnemental	La méthode prend bien en compte les aspects du recyclage qui ont un intérêt d'un point de vue environnemental.
Périmètre du cycle de vie	La méthode doit faciliter ou au moins permettre de maintenir la démarche d'analyse du cycle de vie.
Explicite, justifiée et évaluée	La méthode d'allocation est documentée explicitement, justifiée et évaluée (par l'intermédiaire d'analyse de sensibilité ou d'analyse de scénario)
Clarté	La méthode est documentée avec des termes claires et une structure intelligible de telle sorte qu'elle puisse être comprise par ses utilisateurs.
Pertinence pour les décideurs	La méthode est construite de façon que les décideurs puissent avoir une action sur les paramètres déterminant les impacts. Elle est aussi adaptée aux besoins de connaissances spécifiques des parties prenantes concernées.
Légitimité	La méthode est perçue par les utilisateurs comme solidement ancrée et juste
Reproductibilité	La méthode ne laisse pas ou peu de place à l'ajustement de son design, de telle sorte que les résultats soient reproductibles et que son usage ne puisse pas être détourné.

Dans cette étude, nous proposons d'adapter et de compléter cette grille pour répondre plus spécifiquement à notre objectif d'identifier les divergences entre les méthodes et leurs conséquences sur les performances environnementales des produits contenant du recyclé. Pour cela un travail de réappropriation et de déclinaison des critères en sous-critères a été mené. Cela a permis d'identifier des liens d'interdépendance entre les critères. Afin d'évaluer les méthodologies, des sous-critères ont été définis de façon à être le plus quantifiable possible.

La *Figure 3* présente la synthèse de ce travail. Les sous-critères clés qui seront évalués pour les 4 différentes méthodologies de modélisation des matériaux recyclés sont mis en lumière (police en rouge).

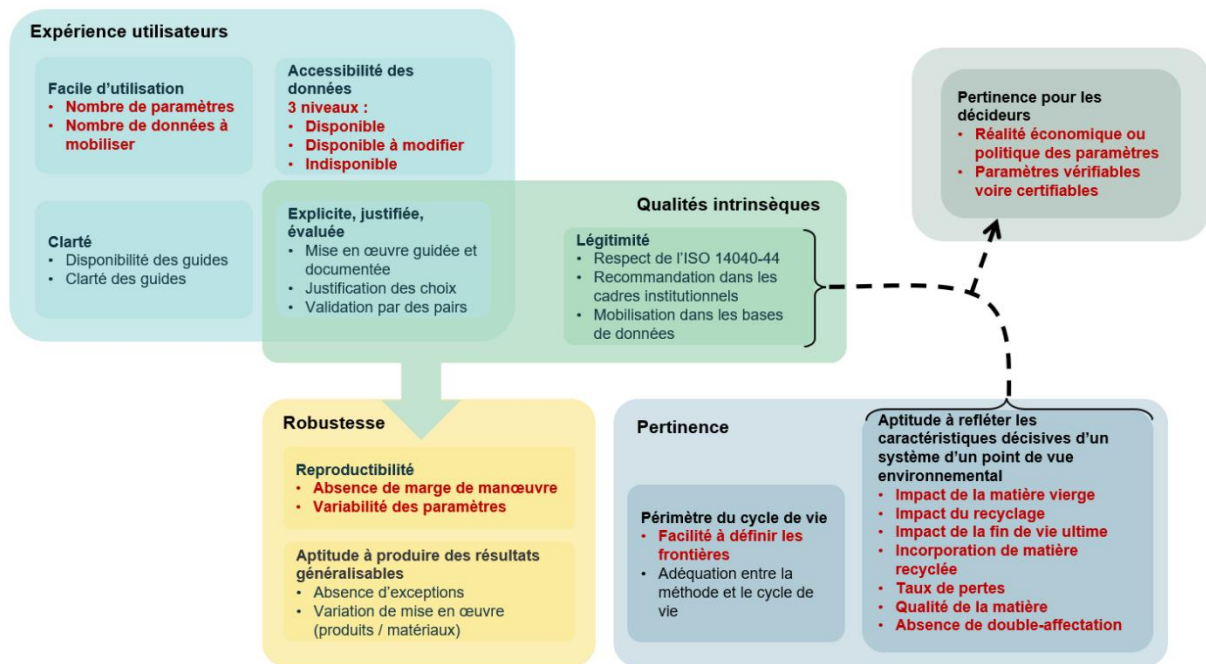


Figure 3 : Réappropriation et sélection des critères d'analyses des méthodologies

Les critères retenus et leur définition sont décrits dans le *Tableau 4* afin d'apporter une meilleure compréhension.

Tableau 4 : Description des critères d'analyses après adaptation

Sous-critères	Description
Facilité d'utilisation	
Nombre de paramètres	Quantification du nombre de paramètres nécessaires pour appliquer la méthode
Nombre de données à mobiliser	Quantification du nombre de valeurs à déterminer pour les paramètres, ainsi que du nombre de données d'inventaire à mobiliser pour appliquer la méthode
Accessibilité des données	
Accessibilité des données	3 niveaux peuvent être définis à propos des données d'inventaire ou les valeurs numériques des paramètres : disponible (au sein des bases de données ou dans les guides)/ disponible mais à modifier/ indisponible
Reproductibilité	
Absence de marge de manœuvre	La méthodologie ne laisse pas place à l'interprétation dans son application pour définir par exemple les valeurs de paramètres ou pour mettre en œuvre la modélisation par exemple pour la détermination de la fin de statut de déchets
Variabilité des paramètres	Les paramètres évoluent. Ils peuvent être mis à jour dans le temps
Pertinence	
Facilité à définir les frontières	Les frontières du périmètre sont faciles à identifier. Est-il par exemple clairement défini comment affecter les procédés de pré et post-traitement des déchets ?
Impacts	Les impacts de la matière vierge, du process de recyclage et de la fin de vie ultime sont pris en compte
Incorporation de matière recyclée	Les dynamiques et contraintes de gisement de matière recyclée sont-elles prises en compte ?
Taux de pertes	Les pertes occasionnées par le process de recyclage sont prises en compte.
Qualité de la matière	La dégradation de la qualité de la matière est prise en compte.
Absence de double-affectation	Les bénéfiques ou impacts ne sont pas affectés doublement, même entre deux cycles de vies produits différents.
Pertinence pour les décideurs	
Réalité économique ou politique des paramètres	Les paramètres employés dans la méthode font directement référence à une réalité économique et politique. Par opposition, un paramètre purement mathématique ne peut être relié à des variables économiques ou politiques.
Paramètres vérifiables voire certifiables	La méthode repose sur des paramètres qui peuvent faire l'objet d'un audit de validation ou même d'une certification (par exemple le taux d'incorporation en recyclé).

2.2 Analyse comparative de 4 méthodologies de modélisation des matériaux recyclés

2.2.1 Cut-off

L'approche la plus répandue pour modéliser le recyclage est la méthode de coupure, ou Cut-Off, ou méthode des stocks, ou encore dite méthode 100/0 (car 100% de l'impact de la matière vierge est allouée au produit qui utilise la matière vierge). Chaque produit se voit attribuer uniquement et intégralement les charges environnementales des processus affectés à son cycle de vie. La principale difficulté consiste donc à définir la frontière entre les cycles de vie : cette frontière doit-elle se situer en amont, pendant ou en aval du recyclage du matériau ?

Les instructions générales du programme du système international de déclarations environnementales de produits (DEP) recommandent la méthode Cut-Off, avec comme frontière entre les cycles de vie le point où le matériau présente sa valeur marchande la plus faible⁴. Ce point se situe généralement avant que les déchets ne soient collectés pour être recyclés. Aussi, les processus de recyclage doivent être inclus dans la DEP du produit pour lequel le matériau recyclé est utilisé (Figure 4).

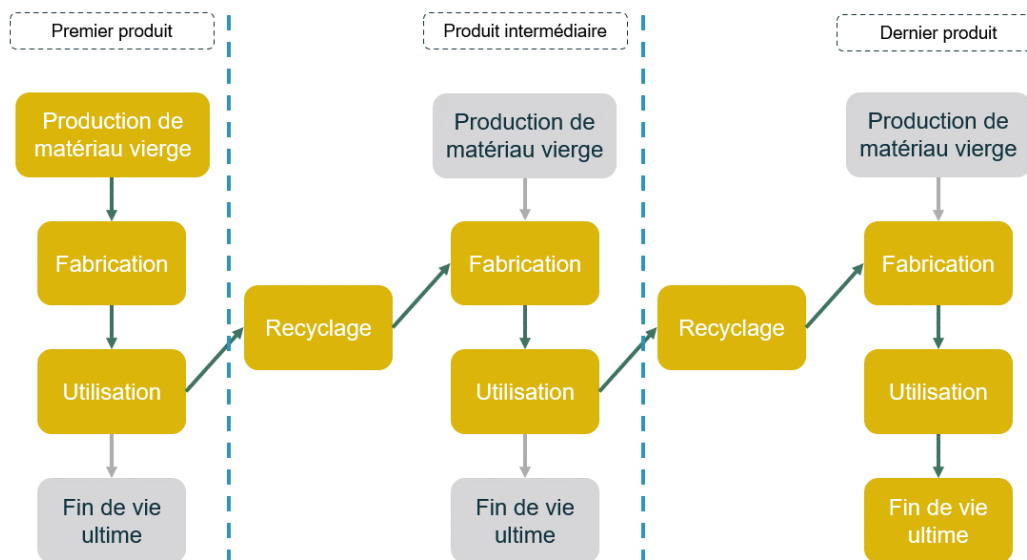


Figure 4 : La méthode Cut-Off comme spécifié dans les systèmes EPD. En bleu la frontière entre les produits premier, dernier et intermédiaire

Cette méthode permet de calculer l'impact environnemental (E) par unité d'analyse de la production de matières vierges, du recyclage et de l'élimination des déchets d'un produit selon l'équation suivante :

Équation 1 : Formule de calcul de l'impact environnement E selon la méthode Cut-off

$$E_{cut-off} = (1 - R1) \times EV + R1 \times E_{Rec} + (1 - R2) \times ET$$

Où :

- R1 est la part de recyclé dans le produit ;
- R2 est le taux de recyclage du matériau après utilisation du produit.

La Figure 5 montre les résultats de la méthode Cut-Off appliquée au cas générique. L'intégralité de l'impact de la matière vierge est allouée au premier produit. Le premier produit ainsi que le produit intermédiaire (qui est entièrement recyclé) ne présentent aucun impact issu de la fin de vie.

⁴ EPD International (2021) General Programme Instructions for the International EPD® System. Version 4.0. www.environdec.com

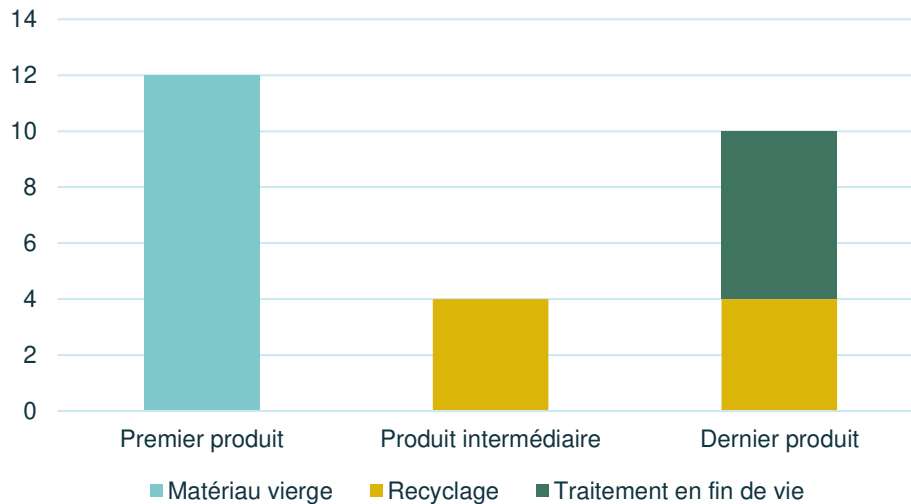


Figure 5 : Résultats pour la méthode Cut-Off appliquée au cas générique

En calculant l'impact global sur les trois produits théoriques étudiés, on obtient :

$$E(\text{tot})_{\text{Cut-Off}} = E1 + E2 + E3 = 26$$

A partir des éléments ci-dessus nous proposons de synthétiser les effets du choix de la méthode Cut-off pour modéliser le recyclage. La méthode Cut-off :

- Incite l'utilisation de matériaux recyclés à condition que le recyclage présente moins d'impact environnemental que la production de matériaux vierges ($EV > E_{\text{Rec}}$) ;
- Incite à recycler un produit après son utilisation lorsque le traitement a un impact positif et est donc une charge pour l'environnement ($ET > 0$) ;
- Incite faiblement au recyclage lorsque ET est peu élevé ou lorsque le gain environnemental global du recyclage ($EV + ET < E_{\text{Rec}}$) est faible ;
- N'incite pas au recyclage après utilisation, lorsque le traitement des déchets entraîne un bénéfice environnemental.

En appliquant la grille d'évaluation décrite dans la section 2.1.3 Les critères d'évaluation (Tableau 5).

Pour rappel, la légende utilisée est la suivante :

Satisfaisant
Présente des limites
Manque ou approche inadaptée

Tableau 5 : Grille d'évaluation de la méthode Cut-off

Critères d'évaluation	Cut-Off	Commentaires
<i>Facile d'utilisation</i>		
Nombre de paramètres	2	R1, R2
Nombre de données à mobiliser	5	R1, R2, donnée vierge, donnée recyclée, donnée fin de vie
<i>Accessibilité des données</i>		
Accessibilité des données (disponible, disponible à modifier, indisponible)		Pas de modification à faire pour des données type ecoinvent (Base de données (BDD) adaptée au cut-off)
<i>Robustesse</i>		
Absence de marge de manœuvre	Frontière à définir au cas-par-cas	Seul bémol, la définition de la frontière mais en pratique celle-ci est plutôt clairement établie
Variabilité des paramètres	Nécessite des données spécifiques	Donnée spécifique R1, R2
<i>Périmètre du cycle de vie</i>		
Facilité à définir les frontières		Notion de coupure qui définit clairement les frontières du cycle de vie
<i>Aptitude à refléter les caractéristiques décisives d'un système d'un point de vue environnemental</i>		
Impact de la matière vierge		Ces trois impacts sont pris en compte dans le calcul d'impact
Impact du recyclage		
Impact de la fin de vie ultime		
Disponibilité de la matière recyclée	Non pris en compte	Les dynamiques de gisements ou autres n'interviennent pas dans la méthode
Taux de pertes	Non pris en compte	Le taux de perte n'intervient pas
Qualité de la matière	Non pris en compte	La dégradation de la matière n'intervient pas
Absence de double-affectation		Il n'y a pas de double affectation
<i>Pertinence pour les décideurs</i>		
Réalité économique ou politique des paramètres	Pas de prise en compte de la notion d'Offre / Demande	Les paramètres concernent le contenu en recyclé. Ni parlant ni abstrait sur le plan économique et politique
Paramètres vérifiables voire certifiables	R1 uniquement	R1 peut être vérifiable et certifiable

L'approche méthodologique **cut-off** est facile à mettre en œuvre par l'utilisateur. Les données à utiliser sont directement disponibles dans les bases de données type ecoinvent.

Pour autant, cette approche ne rend pas compte de certaines caractéristiques environnementales du système comme la disponibilité ou encore la qualité de la matière recyclée.

Enfin, sa pertinence vis-à-vis des décideurs présente des limites.

2.2.2 Cut-off avec crédits (EN15804)

La norme internationale (ISO 21930:2017) pour les déclarations environnementales des produits de construction ne suit pas le programme du système international de déclarations environnementales de produits (DEP) et impose l'utilisation de la méthode **Cut-off avec crédits**. Cette approche diffère de la méthode Cut-off simple par **l'inclusion des impacts environnementaux évités par le recyclage des matériaux**.

L'équivalent européen relatif aux DEP pour la construction est la norme EN 15804 qui impose aussi la méthode **Cut-off avec crédits**. Tous les 5 ans, cette norme est révisée via des amendements. La dernière version date de 2019 et intègre un deuxième amendement (EN15804+A2:2019) applicable au plus tard en octobre 2022 dans les pays de l'union européenne. Ainsi, depuis fin 2022, la phase de fin de vie doit être intégrée dans toutes les déclarations environnementales (optionnel dans la version EN 15 804+A1).

Pour être en conformité avec l'exigence européenne, la version française de la norme (NF EN 15804+A2) a été publiée en octobre 2022 avec un complément national (NF EN 15804+A2/CN). En France, les DEP sont aussi connues sous le nom de Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES). L'INIES est l'organisme public qui collecte et analyse les FDES en France. Des débats sont en cours sur l'interprétation et l'application de la norme française pour la réalisation et la relecture de FDES, et ces différentes interprétations sont présentées dans cette partie.

Ces normes mettent en œuvre **deux grands principes** :

- **Principe de modularité** : lorsque des processus ont une incidence sur la performance environnementale du produit durant son cycle de vie, ils **doivent être affectés au module du cycle de vie dans lequel ils ont lieu**; tous les flux sont alors déclarés dans l'étape du cycle de vie dans laquelle ils se produisent (voir le point Séparation du cycle de vie en modules) ;
- **Principe de pollueur payeur** : les processus de traitement des déchets doivent être affectés au système de produits qui génère les déchets jusqu'à ce que le **statut de fin de déchet soit atteint**.

Pour atteindre le **statut de fin de déchet**, le flux doit :

- Être associé à un **usage spécifique** ;
- Avoir une **demande sur le marché** ;
- Avoir des **exigences légales et spécifiques** ;
- Respecter les **valeurs limites applicables** aux substances extrêmement préoccupantes pour la santé ou l'environnement.

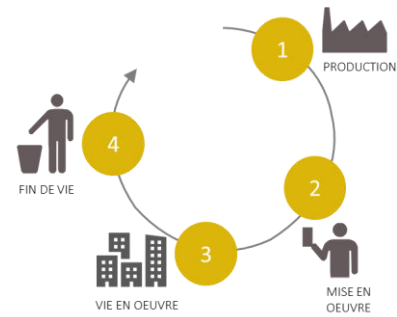
SEPARATION DU CYCLE DE VIE EN MODULES

Pour répondre du principe de modularité, ces normes divisent le cycle de vie d'un produit de construction en étapes A, B et C séparées en modules A1, A2, A3, A4, A5 (noté A1-A5), puis B1-B7 et C1-C4. Les résultats sont rapportés séparément pour chaque module. Une DEP "du berceau à la tombe" comprend les trois étapes, ainsi qu'un quatrième module, appelé module D dont le contenu sera détaillé dans le point Bénéfices et charges au-delà des frontières du systèmes :

La norme EN15804 divise le cycle de vie des produits en 4 grandes étapes, composées de 16 modules :

1. La **production** comprend la fabrication du produit (module A3) mais aussi l'extraction et le traitement des matières premières (module A1) et leur transport (module A2).

2. La **mise en œuvre dans le bâtiment** comprend le transport du produit de l'usine de production jusqu'au site de construction (module A4) où il sera utilisé et la mise en place du produit dans un ouvrage (module A5). Selon **le principe de modularité**, les impacts des accessoires de pose sont à intégrer ici.
3. La **vie en œuvre** (modules B1 à B7) pendant laquelle le produit assure sa fonction dans le bâtiment (en considérant l'usage, la maintenance, la réparation, les consommations éventuelles d'eau et d'énergie...).
4. La **fin de vie** consiste en la déconstruction (module C1), le transport du produit (module C2) jusqu'à un site de valorisation ou d'élimination, et le process d'élimination (modules C3 à C4).



La décomposition précise des étapes en module et une description de chaque module est précisée dans le tableau suivant, extrait de la norme EN15804.

Tableau 6 : Etapes du cycle de vie et modules selon l'EN15804

Module	Description
A1	Extraction et traitement des matières premières, traitement des intrants de matières secondaires.
A2	Transport jusqu'au fabricant
A3	Fabrication
A4	Transport jusqu'au lieu de construction
A5	Installation dans le bâtiment
B1	Utilisation ou application du produit installé
B2	Maintenance
B3	Réparation
B4	Remplacement
B5	Réhabilitation
B6	Besoins en énergie durant l'exploitation
B7	Besoins en eau durant l'exploitation
C1	Déconstruction, démolition
C2	Transport jusqu'au traitement des déchets
C3	Traitement des déchets en vue de la réutilisation, récupération et/ou recyclage
C4	Elimination

La méthode Cut-Off avec crédits correspond à une approche Cut-Off, c'est-à-dire que chaque produit se voit attribuer les impacts environnementaux des processus du cycle de vie de ce même produit. Cependant, elle diffère de la méthode Cut-Off simple par le fait que les **impacts liés au recyclage sont répartis entre le produit recyclé et le produit qui utilise le matériau recyclé**. La **frontière** entre les cycles de vie est définie comme le **point où le matériau recyclable devient un produit commercialisable, c'est-à-dire qu'il n'est plus considéré comme un déchet** (Figure 6).

BENEFICES ET CHARGES AU-DELA DES FRONTIERES DU SYSTEMES :

Comme l'indique le nom de la méthode, il est question de l'application d'un crédit. En effet, un quatrième module, appelé le **module D**, comprend les potentiels bénéfices et impacts des matériaux et combustibles secondaires qui quittent le système de produits pour être utilisés dans des cycles de vies ultérieurs.

Le module D inclut :

- Les impacts associés aux **processus de recyclage et de récupération** au-delà des frontières du système (transport, tri, broyage, etc.) ;
- Les bénéfices potentiels liés à la **baisse d'utilisation** ultérieure de matières et combustibles primaires (vierges).

Le module D prévoit une prise en compte de la **qualité de la matière** ou énergie secondaire générée par le recyclage en appliquant un **facteur de correction**. Ce facteur est noté QR dans ce rapport. Une valeur de QR de 1 traduit une « équivalence fonctionnelle de performance et doit pouvoir être justifiée pour une performance équivalente et pour un scénario d'application réaliste basé sur une réalité physique ».

Pour une matière, QR est calculé avec la masse comme référence. Par exemple s'il faut 1,2 kg de matière secondaire pour atteindre l'équivalence fonctionnelle alors $QR=1/1,2=0,83$.

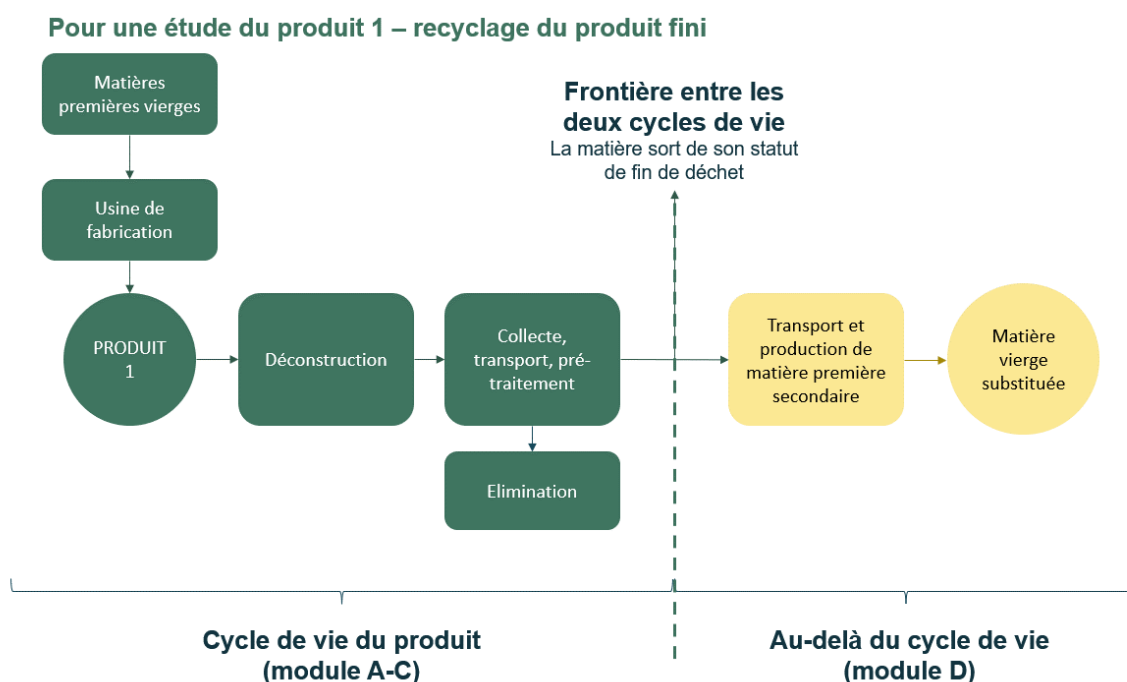


Figure 6 : La frontière entre deux cycles de vie selon la norme EN 15804

MODELISATION EN CUT-OFF PLUS CREDITS

Les bénéfices et charges environnementales de la production de matière vierge, recyclée et du traitement doivent être calculées comme illustré dans la Figure 7.

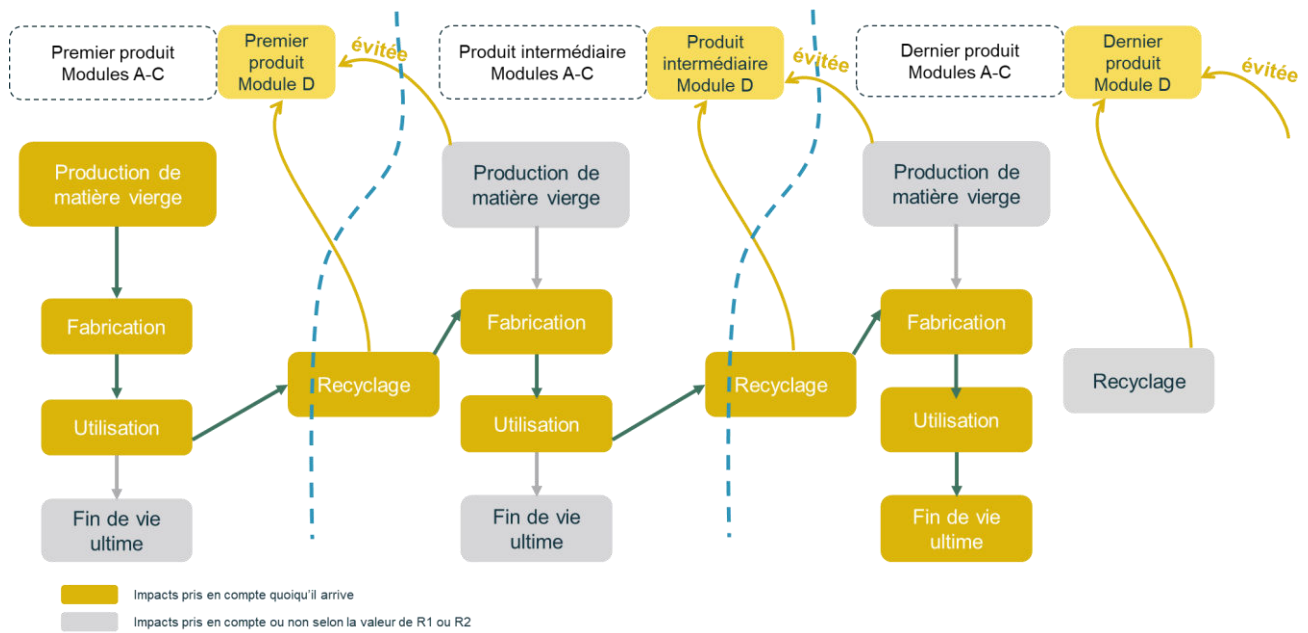


Figure 7 : La méthode Cut-Off plus crédit avec le module D comme spécifié dans l'EN15804. En bleu la frontière entre les différents produits qui se situe au point où la matière sort de son statut de déchet.

Cette méthode permet de calculer l'impact environnemental (E) de la production de matières vierges, du recyclage et de l'élimination des déchets d'un produit selon l'équation suivante :

Équation 2 Formule de calcul de l'impact environnement E selon la méthode Cut-off avec crédit

$$E_{\text{Cut-Off-AC}} = (R2 - R1) \times (ER_{\text{Recpostd\u00e9chet}} - E^* \times QR_{\text{out}}/QR_{\text{rempl}})$$

ou

$$E_{\text{Cut-Off-AC}} = (R2 - R1) \times (ER_{\text{Recpostd\u00e9chet}} - E^* \times QR)$$

Avec :

- $E_{\text{Cut-Off-AC}}$: l'impact environnemental du Module D par unité d'analyse ;
- R1 est la part de recyclé dans le produit ;
- R2 est le taux de recyclage du matériau après utilisation du produit ;
- $ER_{\text{Recpostd\u00e9chet}}$: les bénéfiques ou charges associées aux **processus de recyclage et de récupération par unité d'analyse** au-delà des frontières du système (transport, tri, broyage, etc.) une fois que le flux de matières recyclables n'a plus le statut de déchet ;
- E^* : les bénéfiques ou charges liées à la **baisse d'utilisation** des matières et combustibles primaires (vierges) par unité d'analyse ;
- QR_{out} : qualité du matériau recyclé ;
- QR_{rempl} : qualité du matériau remplacé grâce au recyclage ;
- QR : facteur de correction de qualité ($QR = QR_{\text{out}}/QR_{\text{rempl}}$).

La norme NF EN 15804+A2 ne précise pas la procédure particulière dans le cas où il y a un **bilan net négatif de matériaux recyclés** ($R1 > R2$), autrement dit quand il y a plus de matériaux recyclés utilisés dans le produit que de matériaux recyclés mis à disposition en fin de vie. De même, rien n'est indiqué dans le cas où $R2=0$ qui implique que $ER_{\text{Recpostd\u00e9chet}}$, E^* et QR_{out} sont indéfinis.

Des débats ont eu lieu à ce sujet au sein de la communauté de praticiens de la norme depuis la sortie de la nouvelle version de 2019. En France, l'état des débats en fin d'année 2023 est le suivant selon la décision du COPIL n°113 de l'INIES (règle 1) : « *Le calcul de la contribution au module D est réalisé systématiquement pour les flux nets positifs (correspondant à la notion de flux net quittant le système ou de flux sortant net). Pour les flux nets négatifs ou nuls, la contribution au module D peut être, au choix, calculée ou déclarée nulle* ». À noter que dans le cas d'un flux net négatif ou nul, et dans le cas courant où $E_{Rec_{postd\acute{e}chet}} < E^* \times QR$, alors le module D est positif, donc les entreprises et organisation n'ont pas d'intérêt à le déclarer. Cette décision entraîne donc les conséquences suivantes :

- Les produits qui intègrent plus de matière recyclée qu'ils n'en mettent à disposition en fin de vie ($R1 > R2$) sont avantagés car ils n'ont pas l'obligation de déclarer un module D positif qui les pénaliseraient ;
- Les impacts évités, générés par les produits qui mettent davantage de matière à disposition du recyclage qu'ils n'intègrent du recyclé ($R1 < R2$), ont un module D négatif (bénéfique), et **ne sont pas compensés**.

Dans un contexte où le secteur de la construction est en croissance comme en France, les cas où $R1 > R2$ sont rares et le module D est donc souvent négatif. Nous pouvons donc dire que l'interprétation actuelle de la norme par les praticiens français incite à la mise à disposition de recyclé en fin de vie. En revanche, elle ne pénalise pas les produits qui utilisent beaucoup de matière recyclée et qui ne sont pas recyclables en ne rendant pas obligatoire la publication d'un module D positif. Ainsi, sans la décision INIES, la déclaration de ce module D positif devrait bien être pris en compte dans le cadre de l'application de cette norme. Nous pouvons donc dire que l'interprétation des praticiens français favorise aussi, dans une moindre mesure, l'utilisation de matière recyclée.

Cette interprétation est valable dans le contexte français, mais d'autres interprétations de la norme européenne ont pu être faites dans les différents pays européens.

Dans notre cas générique, nous obtenons les résultats présentés dans la [Figure 8](#), en se plaçant dans le contexte de l'interprétation des praticiens français de la norme. Les hypothèses sont donc les suivantes :

- Le module D ne s'applique que lorsqu'il y a une sortie nette de matériaux recyclés du système (premier produit uniquement dans notre cas car $R1 = R2$ pour le produit intermédiaire et $R1 > R2$ pour le dernier produit) ;
- $\frac{3}{4}$ des activités de recyclage ont lieu après la fin du statut de déchets et donc que $\frac{1}{4}$ des activités de recyclage ont lieu avant et sont donc affectées au module C.

De plus, nous avons agrégé les résultats des modules A à C pour une meilleure visibilité.

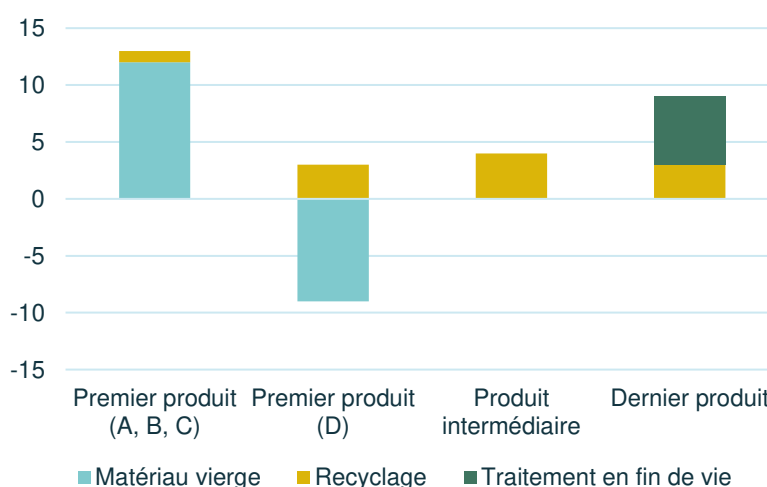


Figure 8 : Résultats pour la méthode Cut-Off plus crédit appliquée au cas hypothétique

Les étapes A à C s'intègrent bien dans le contexte de l'ACV attributionnelle, car elles n'incluent aucun processus au-delà des limites du cycle de vie du produit. Le module D, en revanche, inclut les conséquences de la production et de l'utilisation du produit **en dehors du cycle de vie du produit**. Les impacts évités de la production de matériaux grâce au recyclage sont pris en compte.

Ces informations peuvent rendre confus les résultats d'une ACV attributionnelle, dont l'objectif est d'identifier les impacts environnementaux qui appartiennent au système du produit. Toutefois, les informations sur les conséquences survenant au-delà du cycle de vie du produit s'inscrivent dans le contexte de l'ACV conséquentielle, qui vise à estimer comment les impacts environnementaux globaux sont affectés par la production et l'utilisation du produit.

NB : La norme EN 15804 interdit de sommer le module D aux autres modules (A-C). La somme ci-après est calculée uniquement dans un but illustratif et pour pouvoir comparer les méthodes entre-elles, cette pratique ne répond en aucun cas aux obligations de la norme EN 15804 en termes de déclaration environnementale.

En calculant l'impact global sur les trois produits théoriques étudiés par unité d'analyse, on obtient :

$$E(\text{tot})_{\text{Cut-Off-AC}} = E1(\text{A,B,C}) + E1(\text{D}) + E2 + E3 = 13 - 6 + 4 + 10 = 20$$

ainsi,

$$E(\text{tot})_{\text{Cut-Off-AC}} < E(\text{tot})_{\text{Cut-Off}}$$

L'impact environnemental total de la méthode Cut-Off avec crédit est inférieur à l'impact de la méthode Cut-Off simple ($E(\text{tot})_{\text{Cut-Off}} = 26$) dans notre cas.

Le module D accorde au premier produit un bénéfice pour la production de matières vierges évitée grâce au recyclage ($4 \times 0,75 - 12 \times 0,75$), mais aucun autre produit ne supporte l'impact nécessaire pour compenser ce bénéfice dans le cadre de l'interprétation française de la norme.

De plus, si les résultats totaux des étapes A à D sont rapportés, les impacts environnementaux des processus de recyclage (après fin du statut de déchet $ER_{\text{postdéchét}}$) sont comptabilisés deux fois :

- Dans le module D du premier produit ;
- Dans le module A du produit intermédiaire (voir [Figure 8](#)).

Pour éviter cela, la norme EN 15804 et les normes connexes disposent de règles pour éviter d'agréger les modules A à D. Le module D, doit être déclaré séparément.

A partir des éléments ci-dessus nous proposons de synthétiser les effets du choix de la méthode Cut-off avec crédits (interprétation des praticiens français) pour modéliser le recyclage :

- Elle incite modérément à l'utilisation de matériaux recyclés, ne pénalisant pas ceux qui intègrent beaucoup de matière recyclée sans en mettre à disposition en fin de vie,
- Elle incite **beaucoup** à recycler un produit, en attribuant des bénéfices aux produits qui mettent à disposition les matières pour le recyclage en fin de vie.

En appliquant la grille d'évaluation décrite dans la section 2.1.3 Les critères d'évaluation, voici les résultats obtenus pour la méthodologie Cut-off avec crédit ([Tableau 7](#)).

Pour rappel, la légende utilisée est la suivante :

Satisfaisant
Présente des limites
Manque ou approche inadaptée

Tableau 7 : Grille d'évaluation de la méthode Cut-off + crédit

Critères d'évaluation	Cut-Off + crédit	Commentaires
<i>Facile d'utilisation</i>		
Nombre de paramètres	4	R1, R2, Qrout, Qrrem
Nombre de données à mobiliser	7	Paramètres + donnée vierge, recyclée et fin de vie
<i>Accessibilité des données</i>		
Accessibilité des données (disponible, disponible à modifier, indisponible)		Pas de modification à faire pour des données type ecoinvent (BDD adaptée au cut-off)
<i>Robustesse</i>		
Absence de marge de manœuvre		La norme EN15804 est très précise sur les contributions à prendre en compte ou non dans le calcul du module D
Variabilité des paramètres	Nécessite des données spécifiques	Donnée spécifique R1, R2, Qrout, Qrrem
<i>Périmètre du cycle de vie</i>		
Facilité à définir les frontières		Notion de coupure qui définit clairement les frontières du cycle de vie. Contenu du module D clairement établi.
<i>Aptitude à refléter les caractéristiques décisives d'un système d'un point de vue environnemental</i>		
Impact de la matière vierge		Ces trois impacts sont pris en compte dans le calcul d'impact
Impact du recyclage		
Impact de la fin de vie ultime		
Disponibilité de la matière recyclée	Non pris en compte	Les dynamiques de gisements ou autres n'interviennent pas dans la méthode
Taux de pertes	Non pris en compte	
Qualité de la matière		La dégradation de la matière est prise en compte grâce au facteur de correction QR issu de Qrout et Qrrem
Absence de double-affectation	Pas de compensations des impacts évités	Prise en compte d'impacts évités en dehors du cycle de vie jamais compensés par un autre cycle de vie. L'interprétation française de la norme précise qu'il n'est pas obligatoire de prendre le module D en compte lorsque c'est une charge.
<i>Pertinence pour les décideurs</i>		
Réalité économique ou politique des paramètres	Pas de prise en compte de la notion d'Offre / Demande	Les paramètres concernent le contenu en recyclé. Ni parlant ni abstrait sur le plan économique et politique
Paramètres vérifiables voire certifiables	R1 uniquement	R1 peut être vérifiable et certifiable

L'approche méthodologique **cut-off avec crédit** est plus compliquée à mettre en œuvre que l'approche cut-off. En effet, il y a notamment davantage de paramètres à définir et de données à mobiliser.

Contrairement à l'approche cut-off, cette approche rend compte de l'impact sur la qualité de la dégradation de la matière recyclée.

Enfin, sa pertinence vis-à-vis des décideurs présente des limites.

2.2.3 Circular footprint formula (CFF)

La Commission Européenne dans le cadre du Product Environmental Footprint Category Rules Guidance⁵ (PEF) a développé une méthode de calcul de l'impact de la fin de vie des produits. Elle permet de prendre en compte les impacts évités liés au recyclage et à la valorisation énergétique en fin de vie et de les répartir entre le fournisseur et l'utilisateur de matière recyclée selon les dynamiques de marché du recyclé.

Cette répartition est matérialisée dans la formule par le facteur d'allocation A . Il est dépendant du matériau considéré et traduit l'équilibre ou non entre l'offre et la demande. La CFF fait intervenir plusieurs autres paramètres : R_1 , la proportion de matériau recyclé d'un précédent système incorporé ; R_2 , la proportion de matériau qui sera recyclé dans un futur système ; Q_p , la qualité de la matière première ; Q_{sin} , la qualité du matériau recyclé intégrant le cycle de vie ; et Q_{sout} , la qualité du matériau recyclé sortant du cycle de vie.

La formule CFF dans son ensemble est une combinaison de deux parties : '**matériau + fin de vie**'. Elle permet de calculer l'impact environnemental E de la production de matières vierges, du recyclage et des traitements en fin de vie.

Équation 3 : Formule de calcul de l'impact environnement E selon la méthode CFF

$$E = (1 - R_1)E_v + R_1 \left[AE_{rin} + (1 - A)E_v \frac{Q_{sin}}{Q_p} \right] + (1 - A)R_2 \left(E_{rout} - E_v^* \frac{Q_{sout}}{Q_p} \right) + (1 - R_2)E_D$$

Avec :

- E désigne l'impact environnemental par unité d'analyse (émissions et ressources consommées) ;
- E_v : impact de l'extraction et de la transformation du matériau vierge par unité d'analyse ;
- E_v^* : impact de l'extraction et de la transformation du matériau vierge qui est remplacé par le matériau recyclé par unité d'analyse ;
- $E_{recycled}$ ou E_{rin} : impact du process de recyclage du matériau incorporé (collection, tri, transport) par unité d'analyse ;
- $E_{recycledEoL}$ ou E_{rout} : impact du process de recyclage du matériau en fin de vie (collection, tri, transport) par unité d'analyse ;
- E_D : impact de la valorisation énergétique, de l'enfouissement et autres types de traitement en fin de vie du matériau par unité d'analyse. Pour la clarté de l'explication, il a été préféré de les combiner en E_D . En cas de besoin, le guide du PEF présentent une décomposition plus fine de ce terme.

Afin de mieux cerner les rôles de chacun des termes de la formule, la Figure 9 représente la logique de répartition des impacts entre les deux cycles de vie et situe les différents termes de la formule :

⁵ European Commission, PEFCR Guidance document, - Guidance for the development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs), version 6.3, December 2017.
https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/PEFCR_guidance_v6.3-2.pdf

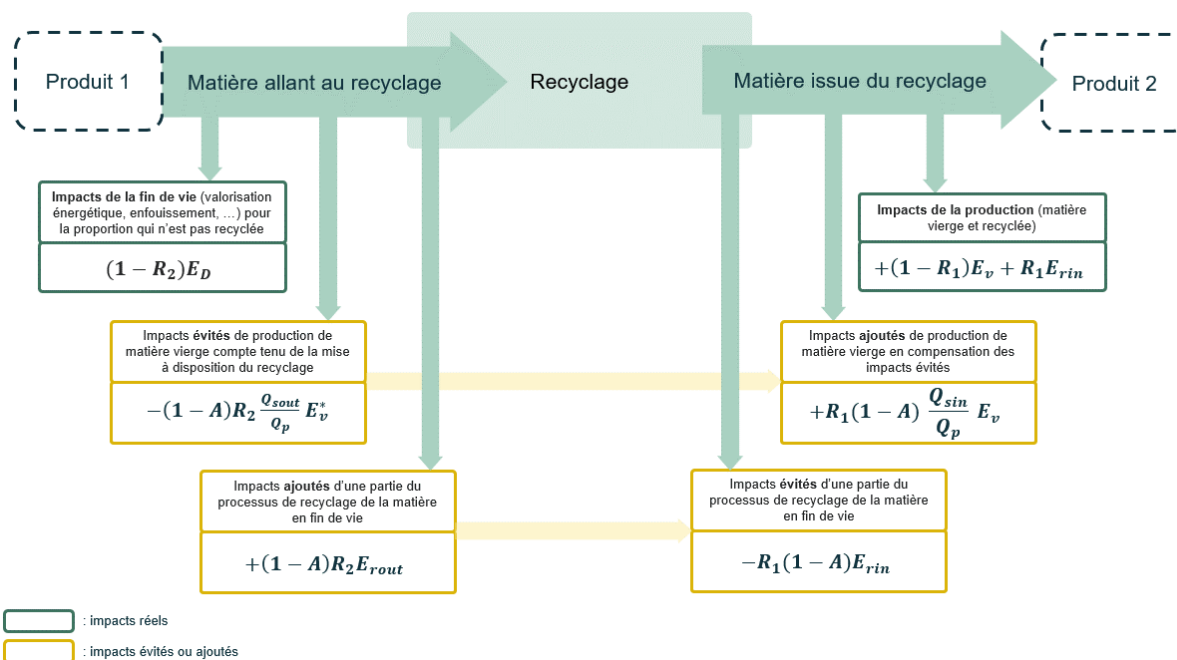


Figure 9 : Représentation schématique de la logique de la CFF

Le facteur d'allocation A donne à R_1 et R_2 un poids différent, reflétant les tendances du marché de la matière. Les valeurs du facteur A sont renseignés par le guide du PEF par matériau ou famille de matériaux dans l'annexe C⁶. A varie entre 0,2 et 0,8 selon le matériau considéré. Pour les métaux et les papiers $A = 0,2$, ce qui indique que la demande en matières recyclées est plus importante que l'offre. Cela se traduit mathématiquement par un bénéfice élevé lié à la mise à disposition de matières recyclées induisant une réduction de la charge environnementale au global du premier produit. Il en va de même pour les impacts ajoutés à l'utilisateur de la matière recyclée (produit intermédiaire et dernier produit) qui, à l'inverse, induisent une augmentation de sa charge environnementale. Le fournisseur de recyclé se voit attribuer un impact réduit, ce qui l'encourage en fin de vie à mettre la matière à disposition du recyclage.

En ce qui concerne les matières plastiques, le facteur A a une valeur de 0,5. L'offre et la demande s'équilibrent tout comme la répartition des impacts. Les impacts évités sont répartis de manière égalitaire entre le fournisseur (premier produit) et l'utilisateur de recyclé (produit intermédiaire et dernier produit).

La représentation de la méthode et de la répartition des impacts en considérant 3 produits est présentée sur la Figure 10 et la Figure 11 pour une valeur de A quelconque entre 0,2 et 0,8. Les impacts évités et ajoutés sont clairement visualisables :

⁶ Annex C, PEFCR Guidance. https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods_en

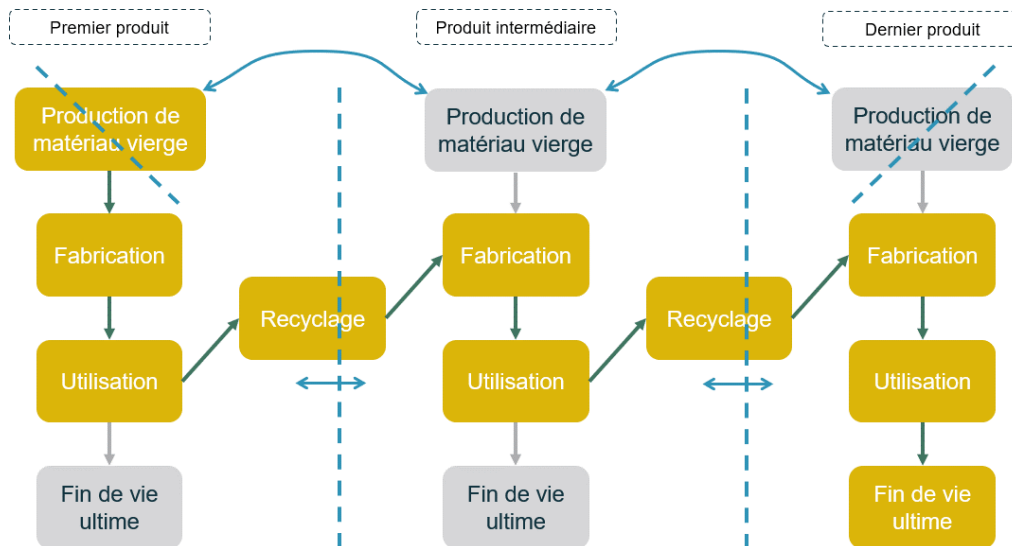


Figure 10 : La méthode CFF. En bleu la frontière entre les produits premier, dernier et intermédiaire

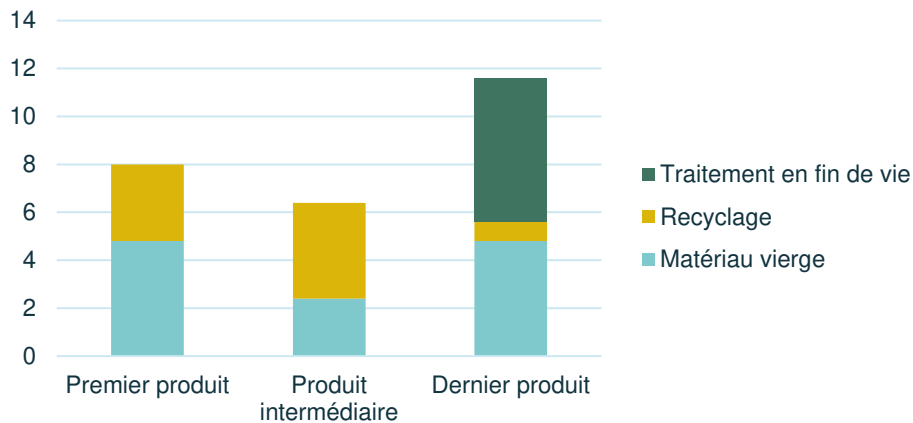


Figure 11 : Résultats pour la méthode CFF appliqués au cas hypothétique en prenant $A=0,2$

En calculant l'impact global sur les trois produits théoriques étudiés, on obtient :

$$E(\text{tot})_{\text{CFF}} = E_1 + E_2 + E_3 = 8 + 6,4 + 11,6 = 26$$

La somme reste toujours la même si l'on fait varier les paramètres de qualité (Q_p , Q_{sin} , Q_{sout}) ainsi que le facteur d'allocation A . La valeur totale pour la CFF est égale à la valeur obtenue pour le Cut-off. C'est le cas uniquement dans la situation où les R_1 et R_2 sont définis comme précisé dans le *Tableau 2*. Cette situation correspond à une situation de recyclage en boucle fermée avec la même quantité en entrée et en sortie malgré une perte de qualité. Lorsque les R_1 et R_2 sont inférieurs à un la somme sur les 3 produits n'est plus égale à la somme pour la méthodologie Cut-off.

A partir des éléments ci-dessus nous proposons de synthétiser les effets du choix de la méthode CFF pour modéliser le recyclage :

- Elle incite l'utilisation de matière recyclée si le facteur A est élevé (0,8) et la mise à disposition de matière au recyclage si le facteur A est faible (0,2)
- Elle incite à conserver la qualité de la matière employée et recyclée et à optimiser l'utilisation de la matière selon son niveau de qualité

Il existe d'autres méthodes reprenant le principe d'allocation des impacts à l'aide d'un facteur. La plupart sont motivées par des tendances économiques de marché comme la *Market price-based method* (Schrijvers et al. 2016) ou encore la *Price-elasticity method* (Ekvall, 2000). Leur fonctionnement est proche de la CFF c'est pourquoi elles ne seront pas détaillées spécifiquement.

En appliquant la grille d'évaluation décrite dans la section 2.1.3 Les critères d'évaluation, voici les résultats obtenus pour la méthodologie CFF (*Tableau 8*).

Pour rappel, la légende utilisée est la suivante :

Satisfaisant
Présente des limites
Manque ou approche inadaptée

Tableau 8 : Grille d'évaluation de la méthode CFF

Critères d'évaluation	CFF	Commentaires
<i>Facile d'utilisation</i>		
Nombre de paramètres	6	R1, R2, A, Qp, Qsin, Qsout (dans la formule simplifiée sans qualification de la fin de vie, qui comporte davantage de paramètres)
Nombre de données à mobiliser	11	Paramètres + donnée vierge, donnée vierge évitée, donnée recyclage du matériau incorporé, process de recyclage du matériau en fin de vie, fin de vie Davantage de données seraient à prendre en compte si la formule complète avec fin de vie avait été considérée.
<i>Accessibilité des données</i>		
Accessibilité des données (disponible, disponible à modifier, indisponible)	Nécessite de remodeliser des données	L'application de la CFF peut nécessiter l'adaptation de données, voire la création de données, car les bases de données ne sont pas spécialement adaptées à celle-ci (comme pour le Cut-Off).
<i>Robustesse</i>		
Absence de marge de manœuvre		Les valeurs des paramètres sont renseignées dans l'annexe C du PEF. Sinon, des valeurs par défaut sont définis.
Variabilité des paramètres	Quid de l'évolution du facteur A	Le paramètre A est supposé pouvoir évoluer dans le temps au gré des dynamiques du marché (en pratique il n'a pas évolué depuis 2018)
<i>Périmètre du cycle de vie</i>		
Facilité à définir les frontières	Frontière non physique, risque d'oubli d'étape	La prise en compte d'impacts évités et ajoutés pondérés par le facteur A ne contribue pas à la clarification des frontières du système et peut entraîner des confusions.
<i>Aptitude à refléter les caractéristiques décisives d'un système d'un point de vue environnemental</i>		
Impact de la matière vierge		Ces trois impacts sont pris en compte dans le calcul d'impact
Impact du recyclage		
Impact de la fin de vie ultime		
Disponibilité de la matière recyclée	Quid de l'évolution du facteur A	Les dynamiques de marché sont prises en compte dans le facteur d'allocation A. Le 'plutôt' se justifie par le manque de mise à jour de ce paramètre dans le temps et le faible nombre de matériau pour lequel celui-ci est défini
Taux de pertes	Non pris en compte	
Qualité de la matière		La dégradation de la matière est prise en compte grâce aux paramètres Qp, Qrout, Qrin
Absence de double-affectation		La répartition des impacts évités/ajoutés est bien effectuée entre les cycles de vie, de façon à garantir un équilibre et éviter les double-affectations
<i>Pertinence pour les décideurs</i>		
Réalité économique ou politique des paramètres		Le paramètre A apporte cette réalité économique et politique
Paramètres vérifiables voire certifiables	R1 uniquement	R1 peut être vérifiable et certifiable

Parmi les différentes méthodes étudiées dans ce rapport, l'approche méthodologique **CFF** est la plus complexe à mettre en œuvre. En effet, elle nécessite de déterminer davantage de paramètres et de mobiliser un plus grand nombre de données.

Néanmoins, cette méthode prend en compte plus de caractéristiques environnementales, comme la qualité de la matière et la disponibilité de la matière. Elle se place également comme la plus précise en termes de pertinence vis-à-vis des décideurs, et ce grâce à la prise en compte de la réalité économique et politique dans la répartition des impacts.

2.2.4 APOS (allocation at point of substitution)

La méthode APOS (allocation at point of substitution) suit l'approche attributionnelle de l'analyse de cycle de vie. Son objectif est de répartir les charges environnementales entre les différentes parties prenantes dans le recyclage : ceux qui produisent le déchet et ceux qui utilisent la matière secondaire une fois traitée.

Dans le cadre d'évaluation environnementale de déchets en fin de vie, il a été constaté que l'allocation des impacts entre chaque étape de traitement s'avérait compliquée à obtenir. L'objectif de la méthode est de ne pas avoir à réaliser cette allocation et pour cela, la charge environnementale liée à ces traitements de recyclage est directement intégrée dans la charge de l'activité qui produit le matériau opérant ainsi une extension du périmètre.⁷

Le système APOS distingue deux types de matériau : les *materials for treatment (mft)* ayant besoin d'un traitement pour être utile et les *materials not for treatment (non-mft)* qui n'ont pas besoin de traitements supplémentaires pour être utiles.⁸ De fait, le point de substitution se trouve après le traitement qui permet d'obtenir le premier non-mft, matériau qui peut être directement employé.

En pratique, l'allocation APOS est une option qui peut être sélectionnée dans ecoinvent. Néanmoins, cette méthode est très peu utilisée. Bien qu'intéressante par l'alternative qu'elle propose, elle reste très complexe à assimiler et à expliquer. De plus, les résultats obtenus avec cette méthode peuvent être difficile à interpréter.

Prenons l'exemple fictif de la production de tuyau en polyéthylène et de la production de bâches agricoles extrait du site d'ecoinvent. Ces deux productions ont pour sortants le produit (tuyaux ou bâches) ainsi que des déchets de PE. D'autre part, le traitement par incinération avec valorisation de ces déchets de PE permet d'obtenir en sortie de l'électricité et de la chaleur. La méthode APOS considère alors que les déchets de polyéthylène produits ne sont plus des sortants mais des intrants à composantes négatives. De fait, les sortants du traitement de ces déchets deviennent un sortant de la production de tuyaux et des bâches qui devient alors une activité à multiples sortants. Des allocations selon les différents sortants sont appliquées. Les activités qui produisent un même sortant par exemple l'électricité sont ensuite rassemblées sous l'activité traitement des déchets de polyéthylène par incinération. Cette activité possède alors des intrants et des sortants venant de la production de tuyaux et de bâches agricoles.

⁷ PRé Sustainability. Finding your way in multifunctional processes and recycling. <https://pre-sustainability.com/articles/finding-your-way-in-allocation-methods-multifunctional-processes-recycling/>

⁸ The ecoinvent database – System models <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/system-models/>

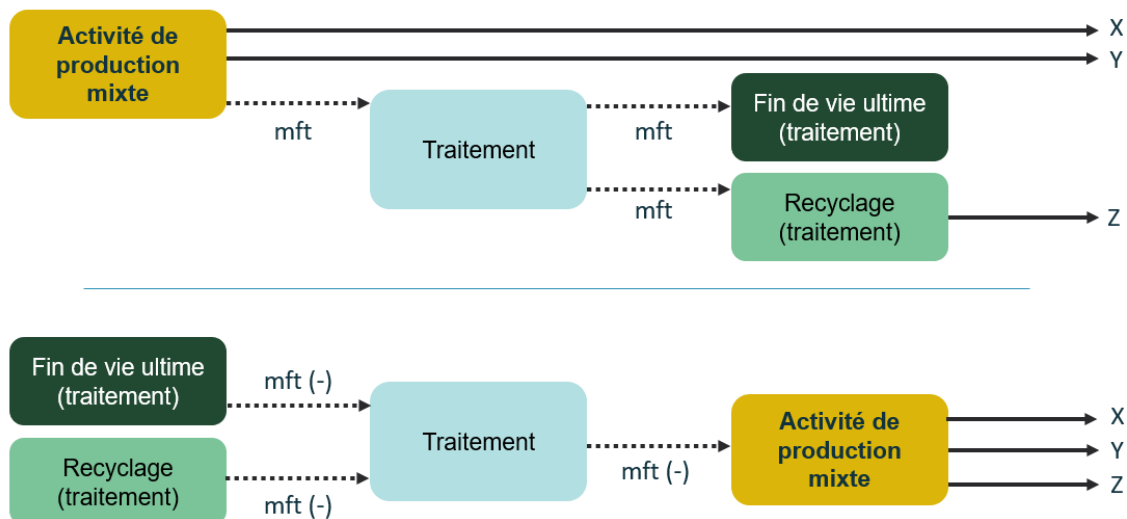


Figure 12 : Représentation du changement de point de vue opéré par la méthode APOS (extrait du site d'ecoinvent)

L'exemple ici ne prend en compte que deux activités de production différentes mais dans la réalité, elles peuvent être bien plus nombreuses, augmentant la complexité.

L'évaluation par l'intermédiaire de la grille de critères n'a pas été réalisée pour cette méthodologie. Il a été jugé plus pertinent au vu de son utilisation peu fréquente d'en expliquer brièvement les tenants et les aboutissants.

2.3 Analyse des approches non ACV

2.3.1 Les labels environnementaux et normes relatives au recyclage

Dans le cadre de cette étude, qui a pour objectif final de guider l'achat de produits contenant du recyclé garantissant un plus haut niveau de performance environnemental par rapport à la version 100% vierge, nous nous sommes intéressés aux labels pouvant indiquer à l'acheteur que le produit contient des matières recyclées, dans quelles proportions, avec une éventuelle approche cycle de vie. L'objectif était notamment d'évaluer le niveau de cohérence de ces labels avec les méthodologies ACV et d'alimenter la réflexion concernant la nécessité de quantifier les impacts et les risques de potentiels transferts d'impacts.

Dans un premier temps, il est nécessaire de définir ce qu'est un label : ce terme recouvre les pictogrammes ou textes informant qu'un produit répond à certains critères établis dans un cahier des charges. Selon les labels, ces critères portent sur la qualité, la sécurité, l'origine et le mode de production, ou bien dans notre cas d'intérêt sur des critères environnementaux. L'objectif d'un label est de **mettre en valeur un produit ou un service** dont certaines caractéristiques **dépassent les frontières de la réglementation** en informant le consommateur que le produit en question possède ces critères particuliers.

Il faut ensuite distinguer deux catégories de labels :

- Les labels officiels : ils sont établis par une autorité publique nationale ou supranationale (UE par exemple). L'utilisation des labels officiels (et donc le respect du cahier des charges par le fabricant ou le producteur) est le plus souvent contrôlée de manière indépendante ;
- Les labels privés, qui se distinguent en deux sous-catégories :

- Les labels collectifs, émanant de secteurs industriels, d'organismes professionnels ou d'associations considérées comme indépendantes des producteurs. Ils nécessitent un contrôle externe et indépendant ;
- Les labels individuels, développés et utilisés par un fabricant ou un distributeur particulier. Ils relèvent d'une responsabilité individuelle, ce qui implique que le contrôle ne soit pas nécessairement externe et indépendant, ce qui les rend moins fiables que les deux types de labels précédemment cités.

Ce travail nous a également menés à nous intéresser aux certifications, qui diffèrent des labels car elles sont systématiquement délivrées par des organismes reconnus par l'Etat, et le sont donc tout autant.

Dans la diversité des labels et certifications existants, nous avons sélectionné ceux qui nous semblaient les plus pertinents pour cette étude, notamment en nous inspirant d'un travail réalisé pour le compte de l'ADEME (pas encore publié), visant à mettre à jour une méthodologie d'analyse des labels environnementaux apposés sur les produits de consommation courante⁹. L'objectif de cette méthode est de pouvoir recommander les labels les plus respectueux de l'environnement, en évaluant la robustesse de la prise en compte :

- Des 6 enjeux environnementaux clés faisant consensus au niveau international :
 - Changement climatique,
 - Pollutions (air, eau, sol) ;
 - Épuisement des ressources biotiques (vivantes végétales ou animales) ;
 - Épuisement des ressources abiotiques (énergétiques, minérales, en eau) ;
 - Changement d'utilisation des sols (déforestation ou urbanisation) ;
 - Espèces envahissantes ;
- Des hotspots, ou étapes du cycle de vie ou postes (eau, énergies, réactifs, émissions dans l'air par exemple) les plus contributeurs à l'impact environnemental d'un produit. Ces hotspots n'étant pas toujours identifiables dans les référentiels des labels, une possibilité est donc de relier les critères environnementaux de ces derniers (par exemple : interdire les OGM, encourager l'utilisation de matériaux recyclables, etc.) avec les enjeux environnementaux clés et les hotspots des sous-catégories de produits ;
- Du niveau d'exigence des critères environnementaux du référentiel :
 - Critères d'amélioration continue ;
 - Critères d'obligation de moyen ;
 - Critère d'obligation de résultat ;
- Du fonctionnement du label, pour garantir que les produits labellisés soient bien conformes aux référentiels et que ceux-ci soient bien construits pour respecter l'environnement :
 - La consultation des parties prenantes pour l'établissement du référentiel par sous-catégorie de produits, la méthodologie évaluant notamment la diversité du panel consulté : Institutions publiques, Associations (consommateurs, environnementales, ONG), acheteurs professionnels publics et privés, fabricants, fournisseurs. Les institutions publiques et associations sont mieux notées car reconnues pour leur neutralité ;
 - Le niveau d'accessibilité du référentiel de label : accessible uniquement à l'évaluateur / aux professionnels du secteur / à tout le monde, payant/ gratuitement ;

⁹ <https://bibliothèque.ademe.fr/consommer-autrement/4193-100-labels-environnementaux-recommandes-par-l-ademe.html>

- La fiabilité de l'attribution des labels des produits : Label avec auto-déclaration et/ou auto-contrôle du bénéficiaire ou délivré par le titulaire de label ou par un organisme de certification ;
- La fréquence de révision du référentiel du label ;
- La fréquence des contrôles de conformité au référentiel pour les produits labellisés ;
- L'aptitude à l'emploi, afin de s'assurer que le bien labellisé remplit sa performance technique attendue au même titre qu'un bien non labellisé.

Notre étude ne portant pas sur les produits de consommation courante, ni sur l'entièreté du cycle de vie des produits (exclusion notamment de l'étape d'utilisation) cette méthodologie n'était donc pas directement applicable. Nous avons donc choisi de l'adapter en déterminant si les critères environnementaux des référentiels étaient adéquats pour la prise en compte des enjeux environnementaux clés (Changement climatique, Pollutions, Épuisement des ressources abiotiques principalement) et des hotspots liés à la fin de vie et au recyclage de nos matières d'intérêt (étape de logistique pour le béton, ou de fabrication pour le plastique par exemple) ;

- Concernant le niveau d'exigence du référentiel, nous nous sommes intéressés à la prise en compte du niveau de recyclage et l'incorporation de matière recyclée :
 - Pour les critères d'amélioration continue, nous nous sommes notamment intéressés aux recommandations pour favoriser l'emploi de matière recyclée ;
 - Pour les critères d'obligation de moyen, certains labels exigent notamment que les produits labellisés ne doivent pas contenir de substances nocives ayant un impact négatif sur le processus de recyclage ;
 - Pour les critères d'obligation de résultat, nous avons sélectionnés les labels dont les référentiels exigeaient par exemple une teneur minimale en matériaux recyclés ;
- Concernant le fonctionnement du label :
 - La diversité des parties prenantes consultées pour l'établissement du référentiel ;
 - Le niveau d'accessibilité du référentiel de label, pour lequel nous précisons par ailleurs si la certification est gratuite ou payante ;
 - La fiabilité de l'attribution des labels des produits ;
 - Le niveau de conformité à une éventuelle norme et les éventuels écarts.

Il est ressorti de ces recherches que la plupart des labels et certifications concernant nos matières d'intérêt s'adressent aux consommateurs (donc par définition, qui souhaite acquérir un produit pour un usage privé) plutôt qu'aux acheteurs professionnels. Néanmoins certains des produits qu'ils couvrent peuvent adresser les matières qui nous intéressent : typiquement les emballages plastiques ou les produits de construction et d'aménagement.

Concernant le **béton**, deux labels à destination des professionnels sont néanmoins ressortis de nos recherches :

- Le label privé collectif du Concrete Sustainability Council (CSC) belge a développé un système de certification de la RSE spécifique aux entreprises du secteur du béton, du ciment et des granulats, qui est applicable mondialement. Son cahier des charges contient des critères écologiques, sociaux et économiques, et est essentiellement axée sur la gestion durable de l'entreprise et l'approvisionnement responsable de matières premières.

Elle intègre un module supplémentaire nommé "R", qui nous intéresse plus particulièrement car elle concerne le béton contenant des granulats recyclés¹⁰. L'utilisation de béton CSC permet d'obtenir des points dans divers systèmes de certification des bâtiments, notamment BREEAM (BRE Environmental Assessment Method, référentiel de certification environnementale britannique délivré par le BRE - Building Research Establishment) et DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen), la BREEAM étant l'une des méthodes les plus anciennes et les plus utilisées pour évaluer et certifier la durabilité des bâtiments et le DGNB étant un label allemand permettant de décrire et évaluer objectivement la durabilité des bâtiments. Pour obtenir ce label avec module R, les 5 critères suivants doivent être remplis :

- Approvisionnement responsable ;
 - Traçabilité de l'origine des matériaux utilisés ;
 - Garantie de la teneur en matériaux recyclés, et de leur certification initiale ;
 - Avec un taux minimum (non renseigné) ;
 - Avoir un système de management de la qualité.
- Côté français, le label officiel 2EC (Engagement Economie Circulaire construction et aménagement) est à destination des acteurs du BTP¹¹. Porté par le Ministère de la transition écologique et solidaire, ses contrôles sont réalisés par le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement), qui vise à développer et promouvoir l'économie circulaire dans les territoires à travers la labellisation de projets de construction et d'aménagement.

Ce label repose sur l'engagement d'un porteur de projet, et valorise l'ensemble des intervenants. Il implique des critères concernant la prévention et la gestion des déchets générés dès la conception du projet, ainsi que la valorisation des matériaux alternatifs issus d'installations de recyclage ou de chantiers excédentaires, avec notamment la réalisation en amont du projet d'un diagnostic prévisionnel des déchets de conception, la favorisation du réemploi, la traçabilité des déchets jusqu'à la valorisation ou l'élimination finale.

- Enfin, l'écolabel officiel Allemand Ange Bleu, un des plus anciens et des plus stricts couvrant les produits de consommation courantes, permet de labelliser des produits en béton contenant des granulats recyclés pour les revêtements de sol extérieurs (Pavés, dalles de pavage et bordures en béton)¹². Ce label est attribué à des produits présentant un impact moindre sur l'environnement et une protection de la santé de l'utilisateur pour des performances équivalentes à celles de produits de la même catégorie.

Pour le béton, il propose une approche cycle de vie, pour la prise en compte de la préservation des ressources naturelles que sont le gravier et le sable, ainsi que l'aspect climatique concernant les phases allant de la fabrication au transport des produits. L'aspect pollution concerne tout le cycle, jusqu'à la phase d'utilisation et d'élimination finale, étant donné que les produits en béton tels que les pavés sont parfois installés sur de grandes surfaces et entrent donc en contact avec le sol ou l'eau de pluie. Pour évaluer ces émissions le label se base sur le "test de lixiviation de surface dynamique horizontale" conformément à la norme CEN/TS 16637-2.

Les produits ne doivent également pas contenir de substances nocives ayant un impact négatif sur le processus de recyclage, et encourage l'utilisation de matériaux recyclés, et la facilitation de la réutilisation et du recyclage des produits certifiés à la fin de leur phase d'utilisation. Il exige au moins 30 % de granulats recyclés (>2mm), résiduels de l'usine de fabrication ou d'autres déchets de construction ou de démolition. De plus, le demandeur doit vérifier l'origine et la

¹⁰ https://csc.eco/wp-content/uploads/2022/10/Technical-Manual-CSC-R-Module-V2.1_Global_2022-10-10.pdf

¹¹ https://www.label-2ec.fr/sites/label2ec/files/inline-files/Cerema_2EC_Charte.pdf

¹² <https://www.blauer-engel.de/en/productworld/concrete-products-containing-recycled-aggregates-for-outdoor-flooring-new>

composition des granulats recyclés en soumettant une analyse des flux de matériaux (avec une vérification calculée et justifiée de manière plausible de la proportion de granulats ne provenant pas de matériaux résiduels de l'usine de fabrication).

- Le label officiel Nordic Swan des pays scandinaves, proposant également une approche cycle de vie, labellise quant à lui les nouveaux bâtiments, et promeut l'économie circulaire, avec des exigences concernant la réutilisation, le recyclage et l'utilisation d'autres matériaux de récupération¹³.

De façon plus générale, les critères de ce label (par catégories de produits) ont pour objectif de promouvoir les produits réduisant leur impact environnemental (réchauffement climatique, pollutions de l'air, de l'eau et des sols), avec une consommation d'énergie limitée et encourageant le recours aux ressources (dont énergies) renouvelables et l'emploi de recyclé. Il encourage également l'écoconception, notamment pour favoriser le recyclage : désassemblage facilité, exclusion des matériaux non recyclables.

Il précise, pour le cas particulier des fenêtres et portes d'extérieur qui doivent contenir une certaine proportion de matière recyclée : 40% pour l'aluminium ; 30% pour le PVC et 20% pour l'acier.

Concernant les **matières plastiques** :

- Le label Nordic Swan adresse principalement les emballages, en fixant des exigences d'utilisation de matière recyclée, et en promouvant les produits à matériau unique pour faciliter le recyclage ;
- Le label Ange Bleu labellise également des produits constitués de plastiques recyclés respectueux de l'environnement¹⁴, films plastiques compris. Ce label exige l'introduction d'au moins 80% de matière plastique recyclée ;
- Concernant les professionnels, nos recherches ont fait ressortir deux certifications d'intérêt :

- La certification française NF 558 MPR¹⁵ (matières premières de recyclage plastique) qui permet de certifier la qualité de produits constitués de plastique recyclé, et plus précisément les matières PE, PET, PP, PS, PVC, concernant les caractéristiques suivantes : Caractéristiques mécaniques, physico-chimiques, dimensionnelles et colorimétriques, traçabilité, depuis les déchets entrants, jusqu'aux MPR plastiques.

Elle vérifie que les paramètres de production permettent de se référer à des éco-profilés de référence MPR, comportant 24 paramètres environnementaux, dont l'impact "Réchauffement climatique", qui est l'un des facteurs différenciants entre les MPR et les matières premières vierges.

L'objectif de cette certification est de valoriser le bénéfice environnemental de l'utilisation des MPR plastiques, ainsi que la qualité des résines recyclées à travers une marque de certification reconnue, pour en augmenter l'utilisation en substitution totale ou partielle des résines vierges.

- Les 3 certifications de l'initiative européenne RecyClass¹⁶, une organisation à but non lucratif montée par plusieurs entreprises de l'industrie plastique et qui concerne tous les acteurs de la chaîne de valeur des plastiques utilisant des plastiques recyclés. Ces 3 certifications sont :

¹³ <https://www.nordic-swan-ecolabel.org/criteria/>

¹⁴ <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/en/DE-UZ%2030a-201901-en%20Criteria%20version%2010.pdf>

¹⁵ <https://certification.afnor.org/qualite/matieres-premieres-de-recyclage-plastiques>

¹⁶ <https://recyclclass.eu/get-certified/>

- La certification de recyclabilité, qui évalue la compatibilité des emballages plastiques avec l'ensemble de la chaîne de gestion des déchets, qui comprend la collecte, le tri, le recyclage et la capacité du matériau recyclé à être réutilisé dans son application d'origine ;
- La certification concernant le processus de recyclage, afin de valider les processus de recyclage des plastiques pour les déchets de pré-consommation et de post-consommation opérant sur un site, et permettant aux recycleurs de démontrer leur contribution à la gestion des déchets plastiques et de communiquer de manière transparente l'origine des déchets ;
- La certification concernant les plastiques recyclés obtenus, se concentrant sur leur traçabilité au sein d'un processus et sur la vérification d'un pourcentage donné de contenu en plastique recyclé dans les produits. La technique permettant de vérifier ce taux est utilisée par les labels Nordic Swan et Blaue Engel.

Concernant l'acier et le verre, nos recherches n'ont pas fait ressortir de label ou certification aussi pertinentes. Seuls les labels Verre recyclable et Acier recyclable sont couramment utilisés, indiquant que le produit est constitué de matière recyclable et doit être jeté dans le conteneur ad hoc. Ils ne garantissent pas que ces produits soient constitués de matière recyclée ni à quel pourcentage. Enfin, ces labels peuvent être utilisés librement et leurs usages ne sont pas contrôlés.

Le label Ange bleu couvre quant à lui uniquement la **consigne** des bouteilles et produits en verre pour l'alimentaire¹⁷.





Enfin, un autre label ne concernant pas directement nos matières d'intérêt mérite d'être évoqué pour la lisibilité de son logo, particulièrement parlant pour le consommateur : il s'agit du label privé de l'Association des Producteurs et Utilisateurs de papiers Recyclés (APUR). Son logo indique directement le taux de matière recyclée dans l'emballage carton ou papier, ainsi que le numéro d'agrément donné, qui permet d'identifier le pays d'origine et le fabricant, de connaître les caractéristiques et la composition du produit auquel il est attribué. Il garantit également un taux de 50 % à 100 % de fibres recyclées.

Le label APUR peut donc être associé à un label certifiant l'origine des fibres non issues du recyclage, tels que les labels PEFC (Programme de Reconnaissance des Certifications Forestières) ou FSC (Forest Stewardship Council).

Suite à ce travail, nous proposons les 3 grilles ci-dessous, permettant d'évaluer la robustesse des labels et certifications sélectionnés, du point de vue de leur fonctionnement et de leur prise en considération des critères environnementaux les plus pertinents selon le matériau qu'ils valorisent :

¹⁷ <https://produktinfo.blauer-engel.de/uploads/criteriafile/en/DE-UZ%20002-201101-en%20Criteria-V5.pdf>

Tableau 9 : Grille d'analyse du fonctionnement des labels sélectionnés

Intitulé	Pictogramme	Type	Zone géographique	Produits couverts	Consultation des parties prenantes	Fiabilité d'attribution	Niveau d'accessibilité du référentiel de label	Conformité à une norme
Nordic Swan		Label officiel public	Pays scandinaves + Finlande	Multiple pour des produits de grande consommation, Dont fenêtres et portes d'extérieur, construction et rénovation de bâtiments, panneaux de construction	Divers : experts scientifiques, entreprises et toutes autres parties prenantes ayant des connaissances pertinentes	Label délivré et contrôlé par un organisme de certification	Référentiel accessible à tout le monde, gratuitement Certification payante + redevance annuelle	Ecolabel de type 1 selon la norme ISO 14024 - élaboration de programmes de label environnemental (choix des catégories de produits, critères environnementaux, caractéristiques fonctionnelles du produit, et évaluation et démonstration de la conformité)
Ange Bleu		Label officiel public	Allemagne	Multiple hors alimentation et industrie pharmaceutique, dont produits en béton pour les revêtements de sol extérieurs, plastiques recyclés respectueux de l'environnement, produits en verre consignés	Jury d'experts composé de pouvoirs publics, consommateurs, associations, entreprises, universitaires	Label délivré et contrôlé par un tiers indépendant de l'organisme gérant le label	Référentiel accessible à tout le monde, gratuitement Certification payante + redevance annuelle	Ecolabel de type 1 selon la norme ISO 14024 - élaboration de programmes de label environnemental
CSC		Label Privé collectif	Belgique	Béton, ciment et granulats	Divers : Entreprises, Organismes de certification, Organisations de la société civile, Conseils de la construction écologique, Universités	Certification et contrôles réalisés des par des organismes de certification indépendants	Référentiel accessible à tout le monde, gratuitement Certification payante	Norme ISO 14016:2020 – Management environnemental / pas de norme spécifique au module R
2EC		Label officiel public porté par le Ministère de la transition écologique et solidaire	France	Projets de construction et d'aménagement – Label à destination des acteurs du BTP	Institutions publiques, syndicats, professionnels du secteur	Certification et contrôles réalisés par le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement)	Référentiel accessible à tout le monde, gratuitement, Pas de coûts mentionnés pour obtenir la certification	Pas de norme associée mentionnée

Certification NF 558 MPR	Pas de logo	Certification	France	Plastiques et plus précisément les matières PE, PET, PP, PS, PVC,	Non communiqué	Certification et contrôles réalisés par l'AFNOR ou organismes mandatés par l'AFNOR	Référentiel accessible à tout le monde, gratuitement Certification payante	NF EN 15343 - Plastiques - Plastiques recyclés - Traçabilité du recyclage des plastiques et évaluation de la conformité et de la teneur en produits recyclés NF EN 15347 - Plastiques - Plastiques recyclés - Caractérisation des déchets de plastiques
Certifications RecyClass	Pas de logo	3 Certifications	UE	Plastiques	Professionnels du secteur du packaging, du recyclage, fabricants de produits plastiques	Label délivré et contrôlé par un tiers indépendant de l'association gérant le label	Référentiels accessibles à tout le monde, gratuitement Certifications payantes	Certifications alignées sur la norme NF 15343 - Plastiques - Plastiques recyclés - Traçabilité du recyclage des plastiques et évaluation de la conformité et de la teneur en produits recyclés
APUR		Ecolabel privé	France	Carton et papier	Parties prenantes de l'association : producteurs et utilisateurs de papiers recyclés	Label délivré et contrôlé par un tiers indépendant de l'association gérant le label	Accessible sur demande, Information sur les coûts non disponible	Information non disponible

Tableau 10 : Grille d'analyse de la pertinence des critères environnementaux des labels sélectionnés :











Intitulé et logo	Approche cycle de vie	Produits couverts	Enjeux environnementaux clés	Hotspot
 <p>Nordic Swan</p>	✓	Fenêtres et portes d'extérieur, construction et rénovation de bâtiments, panneaux de construction	Changement climatique ✓ Pollutions (air, eau, sol) ✓ Épuisement des ressources abiotiques ✓	Extraction ✓ Transport X Fabrication ✓ Fin de vie ✓
 <p>Ange Bleu</p>	✓	Produits en béton pour les revêtements de sol extérieurs, plastiques recyclés respectueux de l'environnement, produits en verre consignés	Changement climatique ✓ Pollutions (air, eau, sol) ✓ Épuisement des ressources abiotiques ✓	Extraction ✓ Transport ✓ Fabrication ✓ Fin de vie ✓
 <p>CSC</p>	X	Béton, ciment et granulats	Changement climatique ✓ Pollutions (air, eau, sol) ✓ Épuisement des ressources abiotiques ✓ Changement d'utilisation des sols : urbanisation X	Extraction ✓ Transport X Fabrication ✓ Fin de vie ✓
 <p>2EC</p>	X	Projets de construction et d'aménagement	Changement climatique ✓ Pollutions (air, eau, sol) ✓ Épuisement des ressources abiotiques ✓ Épuisement des ressources biotiques : bois ✓ Changement d'utilisation des sols : urbanisation X	Extraction ✓ Transport ✓ Fabrication ✓ Fin de vie ✓
<p>Certification NF 558 MPR</p>	X	Plastiques	Changement climatique ✓ Pollutions (air, eau, sol) ✓ Épuisement des ressources abiotiques ✓	Extraction ✓ Transport X Fabrication ✓ Fin de vie ✓
<p>Certifications RecyClass</p>	X	Plastiques	Changement climatique ✓ Pollutions (air, eau, sol) ✓ Épuisement des ressources abiotiques ✓ Espèces envahissantes : limite la pollution plastique qui en est un vecteur ✓	Extraction ✓ Transport ✓ Fabrication ✓ Fin de vie ✓
 <p>APUR</p>	X	Carton et papier	Changement climatique ✓ Pollutions (air, eau, sol) ✓ Épuisement des ressources biotiques ✓ Changement d'utilisation des sols : déforestation ✓	Extraction ✓ Transport X Fabrication ✓ Fin de vie ✓

Tableau 11 : Grille d'analyse du niveau d'exigence des critères environnementaux des labels sélectionnés

Intitulé et logo	Critères d'amélioration continue	Critères d'obligation de moyens	Critère d'obligation de résultats
Nordic Swan 	Encourage l'écoconception pour le produit et son emballage, notamment pour faciliter le recyclage	Pour les nouveaux bâtiments : promotion de l'économie circulaire, avec exigences concernant la réutilisation, le recyclage et l'utilisation de matériaux de récupération	% de matière recyclée, notamment dans les emballages plastiques et les fenêtres et portes d'extérieur
Ange Bleu 	<p>Couvre les produits présentant un impact moindre sur l'environnement et la santé pour des performances équivalentes</p> <p>Favorise le design de produits (dont composition) permettant le recyclage, voire mieux : la consigne</p> <p>Encourage l'utilisation de matériaux recyclés</p>	<p>Couvre les produits qui ne contiennent pas de substances nocives ayant un impact négatif sur le processus de recyclage</p> <p>Concernant le verre, le label couvre uniquement la consigne des bouteilles et produits en verre pour l'alimentaire</p>	<p>Produits en matière plastique : au moins 80% de matière recyclée</p> <p>Revêtements extérieurs en béton : exige au moins 30 % de granulats recyclés (>2mm), résiduels de l'usine de fabrication ou d'autres déchets de construction ou de démolition. De plus, le demandeur doit vérifier l'origine et la composition des granulats recyclés en soumettant une analyse des flux de matériaux (avec une vérification calculée et justifiée de manière plausible de la proportion de granulats ne provenant pas de matériaux résiduels de l'usine de fabrication)</p>
CSC 	Gestion durable de l'entreprise	Approvisionnement responsable des matières premières, Traçabilité de l'origine des matériaux utilisés, Certification initiale des matériaux recyclés, Système de management de la qualité	Garantie d'un taux minimum de matière recyclée dans le béton ou les granulats utilisés
2EC 	Favorise l'économie circulaire (matériaux alternatifs issus d'installations de recyclage ou de chantiers excédentaires, et réemploi)	Nécessité de réaliser en amont du projet un diagnostic prévisionnel des déchets de conception, la favorisation du réemploi, la traçabilité des déchets jusqu'à la valorisation ou l'élimination finale	/
Certification NF 558 MPR (matières premières de recyclage plastique)	/	Critères de traçabilité, depuis les déchets entrants, jusqu'aux MPR plastiques	<p>Certifie la qualité de produits constitués de plastique recyclé, et plus précisément les matières PE, PET, PP, PS, PVC, concernant les caractéristiques suivantes : Caractéristiques mécaniques, physico-chimiques, dimensionnelles et colorimétriques, traçabilité, depuis les déchets entrants, jusqu'aux MPR plastiques.</p> <p>Elle vérifie que les paramètres de production permettent de se référer à des éco-profil de référence MPR, comportant 24 paramètres environnementaux, mais la certification ne considère que l'impact "Réchauffement climatique"</p>

<p>Certifications RecyClass (Initiative de l'association des recycleurs européens PRE)</p>	<p>/</p>	<p><u>Certification concernant les plastiques recyclés</u> : obligation de traçabilité au sein d'un processus</p> <p><u>Certification de recyclabilité</u> : évalue la compatibilité des emballages plastiques avec l'ensemble de la chaîne de gestion des déchets, qui comprend la collecte, le tri, le recyclage et la capacité du matériau recyclé à être réutilisé dans son application d'origine.</p> <p><u>Certification concernant le process de recyclage</u> : valide les processus de recyclage des plastiques pour les déchets de pré-consommation et de post-consommation opérant sur un site, et permettant aux recycleurs de démontrer leur contribution à la gestion des déchets plastiques et de communiquer de manière transparente l'origine des déchets</p>	<p>Certification concernant les plastiques recyclés obtenus : vérification d'un pourcentage donné de contenu en plastique recyclé dans les produits</p>
<p>APUR</p> 	<p>/</p>	<p>Le numéro d'agrément donné permet d'identifier le pays d'origine et le fabricant, de connaître les caractéristiques et la composition du produit auquel il est attribué</p> <p>Assure le contrôle auprès des producteurs sur la fabrication, le process et les matières premières utilisées</p>	<p>Garanti un minimum de matière recyclée (50%) dans le papier utilisé et affiche le taux réel dans chaque produit</p>

2.3.2 Dans la méthode empreinte projets

La méthode Empreinte Projet est une méthode d'analyse d'impacts différentielle. Son but est de comparer le scénario d'un projet à un scénario de référence, portant sur le même secteur d'activité. L'impact du projet est ensuite évalué en quantifiant la variation d'impact entre les impacts du scénario de référence (sans action) et ceux du scénario dans lequel le projet est réalisé. Cette méthode s'adresse tout particulièrement à des porteurs de projets qui veulent mettre en évidence l'intérêt environnemental de leur projet, à travers différents indicateurs environnementaux, par rapport à une évolution théorique de ce secteur d'activité.

La figure ci-dessous illustre une évaluation sur l'indicateur d'émissions de GES, mais le principe est le même pour tout type d'impact environnemental.

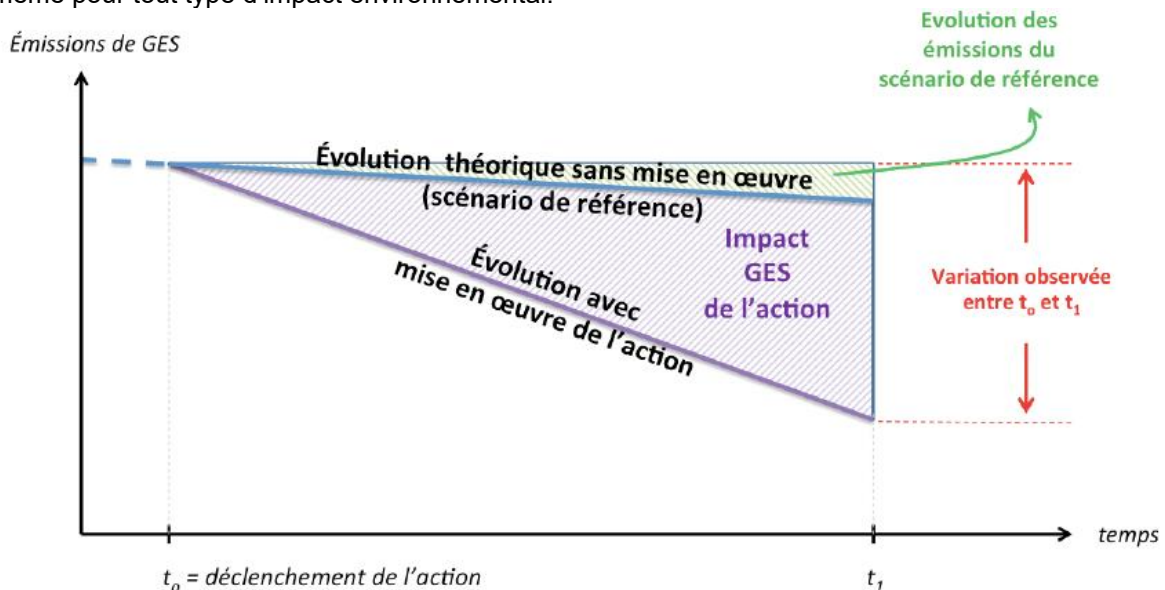


Figure 13 Exemple d'évaluation de l'impact GES d'un projet par rapport au scénario de référence avec la méthode empreinte projet

Une étape essentielle, base de la méthode Empreinte projet, est donc l'établissement d'un scénario de référence pertinent. Une attention toute particulière doit être portée sur ce choix de scénario, en effet un scénario de référence trop dégradée, peu optimiste, pourrait avoir tendance à mettre en évidence des intérêts environnementaux du projet de manière biaisées et inversement un scénario de référence très optimiste aurait pour conséquence de réduire la portée environnementale du projet évalué. Cette méthode devant servir à prioriser l'implantation de tel ou tel projet sur base de leur intérêt environnementale comparé à ce scénario de référence, une uniformisation de ce dernier à l'échelle d'un secteur d'activité semblerait pertinente.

Le scénario de référence est le scénario le plus probable sur la période considérée en l'absence de mise en œuvre du projet à évaluer. Il inclut par nature les facteurs externes au projet, tels que par exemple l'évolution du climat (un climat plus rigoureux que les années précédentes, etc.) et les évolutions de structure (un nombre de salariés plus important depuis la mise en œuvre du projet, etc.). En pratique, il prolonge souvent la tendance d'évolution observée avant mise en œuvre du projet.

La méthode empreinte projet se décline en **cinq niveaux d'approches**, plus ou moins complètes suivant le niveau d'application souhaité. Elles nécessitent des compétences plus ou moins poussées (comptabilité Carbone, ACV) et ne permettent pas les mêmes niveaux de conclusions et de communication, comme indiqué dans la figure ci-après :



Figure 14 Les différents niveaux d'approches de la méthode empreinte projet

Les conclusions possibles en fonction du niveau d'approche sont reprises en détail dans la figure ci-dessous, allant d'une simple évaluation qualitative pour le niveau 1 nécessitant le moins de compétences spécifiques, à l'évaluation quantitative globale, par indicateur, sur l'intérêt global du projet et communicable à l'externe pour le niveau 5 le plus complexe :

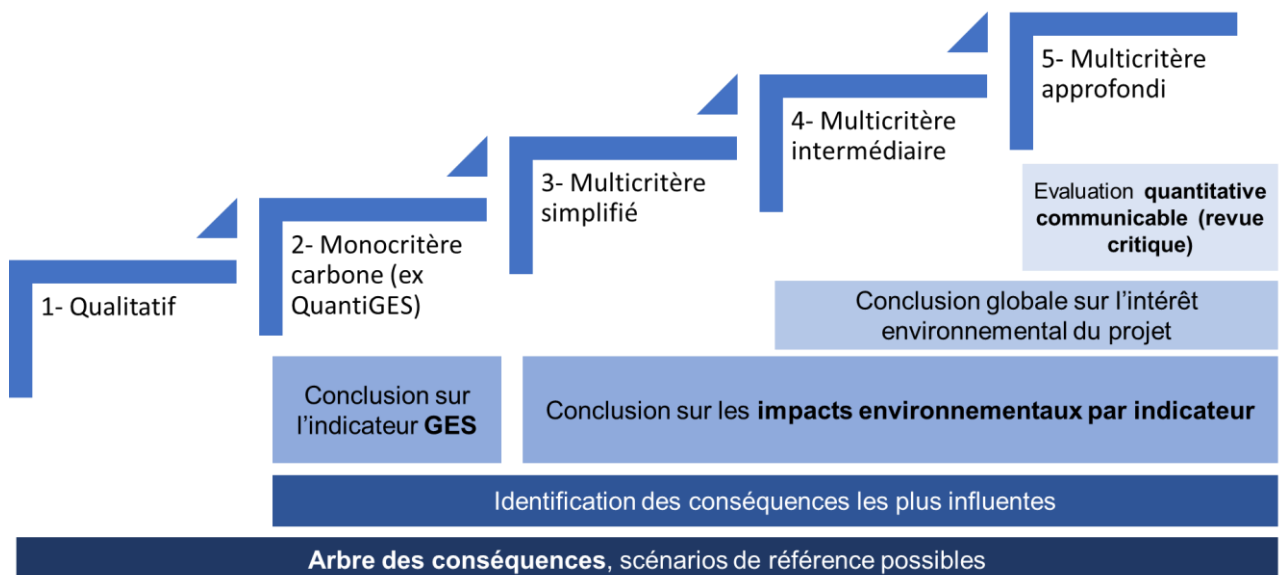


Figure 15 Les conclusions possibles en fonction du niveau d'approche utilisée pour la mesure de l'empreinte d'un projet

Enfin, plusieurs grandes étapes sont nécessaires pour appliquer la méthode empreinte projet :

- Définir les objectifs de l'étude : action à évaluer, objectif final et niveau d'approche ;
- Définir le champ de l'étude : cadre de l'évaluation et scénario de référence, puis les problématiques environnementales les plus pertinentes selon ce cadre avec le choix des

indicateurs environnementaux les plus pertinents, avant de construire l'arbre des conséquences du projet qui permettra de vérifier la cohérence et la justesse du cadre défini initial. Cet arbre de conséquence a pour but de lister l'ensemble des conséquences directs ou indirect en lien avec le projet évalué et le scénario de référence choisi.

Enfin, la définition de ce champ implique d'identifier les facteurs externes au projet pouvant influencer, positivement ou négativement, sur l'impact de celui-ci, telles que des évolutions réglementaires par exemple ;

- Une fois ce cadre posé, peut débuter l'étape de quantification :
 - Réaliser l'inventaire du cycle de vie du projet, pour chaque étape et sous-étape de l'arbre des conséquences établi, avec les données associées à collecter ;
 - Puis analyser et caractériser les impacts des différentes conséquences du projet, et identifier les celles qui sont les plus impactantes ;
 - Afin de pouvoir identifier les indicateurs environnementaux les plus impactés par le projet, agréger tous les impacts de toutes les conséquences ;
- Une fois ces différents travaux et analyses effectuées, l'interprétation des résultats peut être faite, en évaluant en premier lieu la fiabilité de cette évaluation, qui permettra de déterminer si l'objectif de l'étude et le niveau d'approche de l'empreinte projet doivent être revus, ainsi que la qualité du modèle et des données utilisées.

Puis pour chaque indicateurs les impacts de toutes les conséquences de chacun des deux scénarios sont sommés puis comparés pour établir les bénéfices et les charges de chaque conséquence.

Ensuit l'analyse de l'intérêt environnemental du projet évalué par rapport au scénario de référence peut être faite par indicateur puis les résultats peuvent être exploités et communiqués selon le niveau d'approche choisi.

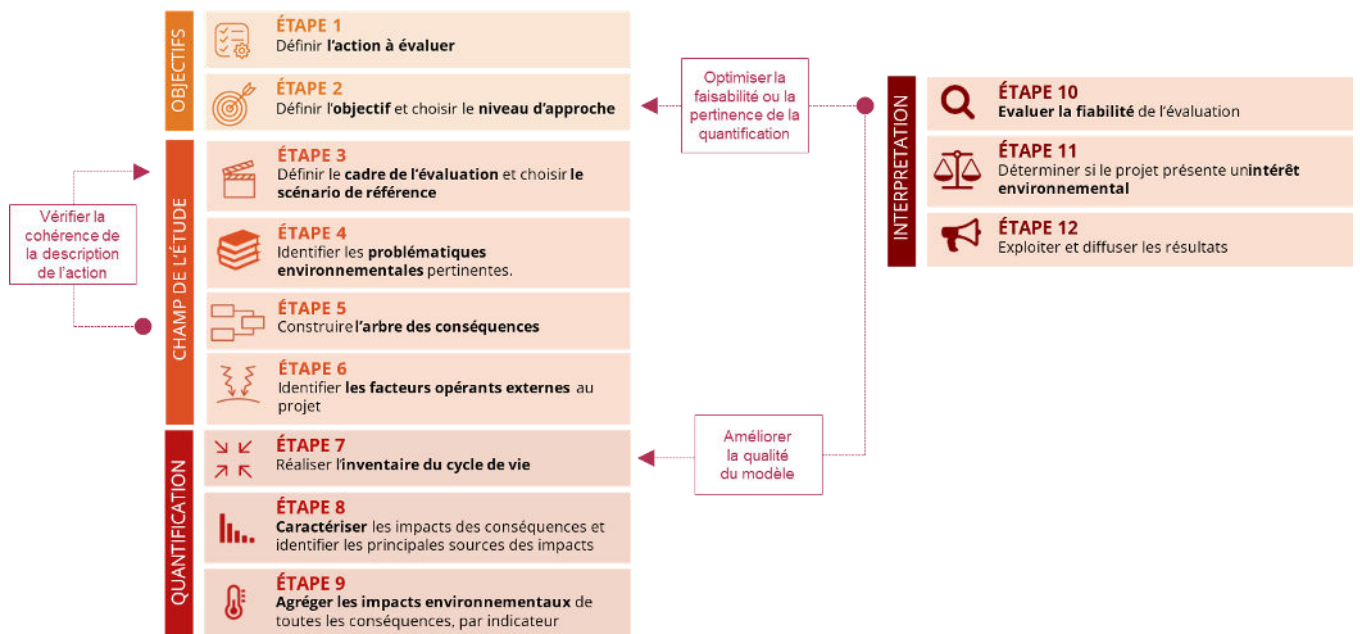


Figure 16 Étapes pour une analyse d'empreinte projet

Un cas d'étude est présenté en Annexe 7 : Construction d'un arbre des conséquences grâce à la méthode empreinte projet – exemple d'un atelier de recyclage de fenêtres, avec l'analyse de l'intérêt environnemental d'un atelier de recyclage de fenêtres grâce à la méthode empreinte projet.

2.4 Identification des paramètres clés influençant les performances environnementales

L'analyse des méthodologies ACV, des labels et de la méthodologie empreinte projet nous a permis d'identifier les principaux critères influençant les performances environnementales des produits contenant des matériaux recyclés. Ils sont présentés ci-dessous par ordre d'importance et repris dans la figure 17.

Paramètres	Cut-off	Cut-off avec crédit	CFF	Labels & certifications	Méthode empreinte projet
Taux de matière recyclée					
Impact du recyclage					<ul style="list-style-type: none"> • Les bases de données ne sont pas très spécifiques concernant les procédés de recyclage • L'impact du procédé de recyclage est attribué de manière hétérogène entre les produits selon l'approche ACV • Seule la certification NF 558 MPR fait référence aux performances des différents procédés de recyclage du plastique
Taux de substitution					<ul style="list-style-type: none"> • Pour les matériaux d'emballages, des valeurs par défaut sont définies par matériau en annexe C de la CFF • Hors matériaux d'emballage, la définition de ce taux est dépendante du niveau d'information disponible par les acteurs impliqués dans la réalisation de l'ACV et du point de substitution.
Tension sur l'offre et la demande					<ul style="list-style-type: none"> • La tension Offre/Demande est intégrée dans la CFF, par l'intermédiaire du facteur A, pour lequel des valeurs par défaut sont définies dans l'annexe C ; mais aucune mise à jour n'est prévue. • L'approche par l'arbre des conséquences proposée par la méthode impact pourrait permettre d'établir plus spécifiquement ce paramètre.
Impacts évités					<ul style="list-style-type: none"> • La mise en œuvre en ACV nécessite l'harmonisation des pratiques dans la chaîne de valeur afin d'éviter l'apparition de bénéfices attribués à certains maillons qui ne seraient pas compensés par des impacts attribués à d'autres maillons. • L'absence de prise en compte de la réalité de marché ou de situations spécifiques, par une approche attributionnelle par exemple, risque de conduire à des transferts d'impact.

Figure 17 Les principaux paramètres pour évaluer l'impact de l'intégration de matières recyclées dans un produit

2.4.1 Taux de matière recyclé

Ce paramètre est repris dans toutes les approches ACV et est le principal critère inclus dans les labels portant sur l'intégration de matière recyclée. Cela dit, un fort taux de matière recyclé ne garantit pas une meilleure performance environnementale du produit. Ce constat est à l'origine de cette étude.

2.4.2 Impact du recyclage

L'impact du recyclage comprend en amont les potentiels pré-traitement nécessaire à rendre la matière recyclable, le transport vers le recycleur et le ou les procédés de recyclage jusqu'à obtention d'une matière secondaire.

Selon les matériaux, les filières de collecte et les procédés de recyclage, les impacts peuvent varier. Nous noterons que les données issues des bases de données ACV n'intègrent pas toujours l'ensemble des étapes et sont peu spécifiques face à la diversité des filières de collecte et des procédés de recyclage.

De plus, une problématique se pose quant à l'affectation de l'impact du recyclage :

- Dans une approche Cut-off, l'intégralité du procédé de recyclage est affectée aux matériaux recyclés ;
- Dans l'approche Cut-off avec crédit, le pré-traitement et la collecte sont affectés aux modules A-C du premier produit, puis l'impact des autres étapes du recyclage est réparti entre le module D du premier produit et les modules A-C du deuxième produit ;
- Dans l'approche CFF, l'impact du recyclage est réparti entre le premier produit et le second produit.

Selon l'impact du recyclage et son affectation il devient plus ou moins intéressant d'incorporer des matériaux recyclés.

Enfin, nous notons que ce paramètre est très peu repris dans les labels. Seule la Certification NF 558 MPR y fait référence pour les plastiques.

2.4.3 Taux de substitution

L'élargissement de l'analyse des impacts à la matière remplacée dans les approches Cut-off avec crédit et CFF, conduit à l'intégration d'un nouveau paramètre : le taux de substitution.

Dans la méthode Cut-off avec Crédit, le paramètre QR traduit l'« équivalence fonctionnelle de performance [...] pour un scénario d'application réaliste basé sur une réalité physique ». En pratique, ce paramètre est calculé à partir de la formule suivante : $QR = QR_{out}/QR_{rem}$ ou QR_{out} correspond à la quantité de matériau recyclé nécessaire pour remplacer une unité de matériaux vierge ($QR_{rem}=1$).

Dans la méthode CFF, 3 paramètres interviennent :

- Q_p , la qualité de la matière première ,
- Q_{sin} , la qualité du matériau recyclé intégrant le cycle de vie ;
- Q_{sout} , la qualité du matériau recyclé sortant du cycle de vie.

Ces paramètres sont intégrés dans deux ratios : Q_{sin}/Q_p et Q_{sout}/Q_p pour établir respectivement l'impact de l'intégration d'une matière recyclée et l'impact d'une matière recyclée. Pour les matériaux d'emballage, des valeurs par défaut pour ces ratios sont définies par matériau en annexe C.

Limites : Hors matériaux d'emballage, la définition de ces ratios est dépendante du niveau d'information disponible par les acteurs impliqués dans la réalisation de l'ACV et du point de substitution. De plus, la qualité étant souvent multifactorielle et spécifique à l'application envisagée, il n'est pas toujours aisé de la définir de manière objective. Plus ce paramètre est défini en amont de la chaîne de valeur, moins il est précis. Enfin, un taux de substitution bas peut être compensé par une modification de la conception du produit (ajout d'additifs par exemple).

Perspectives : Le taux de substitution pourrait être intégré dans les labels et certifications en complément du taux d'intégration, pour éviter les transferts d'impact d'une matière vers d'autres composants du produit.

2.4.4 Tension sur l'offre et la demande

La tension sur le ratio Offre/Demande est explicitement intégré dans la CFF, par l'intermédiaire du facteur A, pour lequel des valeurs par défaut sont définies dans l'annexe C. Plus la demande est élevée, plus la matière recyclée aura d'impact.

Limites : le marché des matériaux recyclés est très volatile. En effet, le secteur du recyclage étant en pleine expansion, de nouveaux produits intègrent le marché régulièrement. De plus, le cours des matières premières vierges est lui-même très volatile, souvent dépendant du cours des énergies. La commission européenne ne prévoit aucune procédure de mise à jour de ce facteur A, affaiblissant ainsi la pertinence de ce paramètre.

Perspectives : L'approche par l'arbre des conséquences proposée par la méthode impact pourrait permettre d'établir plus spécifiquement ce paramètre, et ainsi pallier l'absence de mise à jour par la commission européenne.

2.4.5 Impacts évités

Les impacts évités sont de différentes natures : les impacts évités de la production de la matière vierge qui sont intégrés dans les méthodes Cut-off avec crédit et dans la CFF ; et les impacts évités du non-traitement en fin de vie des matières recyclées, intégrés dans la CFF.

Limites : La mise en œuvre dans les méthodes ACV de bénéfices environnementaux liés à la non-production de matière vierge nécessite l'harmonisation des pratiques dans la chaîne de valeur (notamment pour les applications en cradle-to-gate), afin d'éviter l'apparition de bénéfices attribués à certains maillons qui ne seraient pas compensés par des impacts attribués à d'autres maillons. C'est notamment l'une des critiques pouvant être formulée concernant l'approche Cut-off avec crédit proposée par la France.

Enfin, l'absence de prise en compte de la réalité de marché, par une approche attributionnelle par exemple, risque de conduire à des transferts d'impact. L'évolution de la composition des déchets résiduels pourrait affecter la performance de ces filières par exemple. Dans certaines situations, l'évaluation de l'impact du non-recyclage d'un matériau peut être complexe, comme pour le cas des infrastructures off-shore abritant de la biodiversité.

Perspectives : L'approche par l'arbre des conséquences proposée par la méthode impact pourrait permettre d'évaluer plus spécifiquement ces impacts évités, pour limiter les transferts d'impact.

2.2.5 Illustration de l'influence des méthodes de modélisation sur les résultats ACV

Comme nous l'avons vu, le choix de la méthodologie de modélisation du recyclage peut influencer sur la répartition des impacts des étapes du cycle de vie et donc sur les résultats ACV finaux.

En Annexe 6 : Mise en œuvre des approches ACV sur un exemple (plastique) est présenté un exemple permettant d'illustrer ce propos, en prenant le cas d'un fabricant de boissons souhaitant intégrer du PET recyclé dans ses emballages

3. Analyse sectorielle





La présente analyse sectorielle vise à mieux comprendre la réalité des filières actuelles par matériau, c'est-à-dire les flux de déchets et les étapes de leur collecte, de leur traitement et de leur transformation pouvant contraindre l'incorporation de matière recyclée et avoir une incidence sur son impact environnemental.

Les publications et personnes consultées pour cette analyse sectorielle sont référencées dans les Annexe 1 : Liste des publications consultées et ANNEXE 2 : Liste des personnes consultées .

3.1 Présentation des flux par matériau

Avant de se pencher sur l'utilisation de matière recyclée et le recyclage proprement dit, il est important de bien connaître les flux de matériaux à l'état de déchets, ainsi que leur destination potentielle. Le tableau 12 présente un résumé des informations collectées pour chaque filière à l'échelle Française. Les chiffres sont repris et étayés dans les sections suivantes.

Tableau 12 : Description des filières de recyclage par matériaux pour la France

				
Gisement de déchets	Principalement collectes sélectives	Principalement collectes sélectives (80%)	Principalement industriel	Principalement BTP (90 à 95% de revalorisation sur chantier ou remblais)
Collecte	1 428 kt	13 558 kt	2 310 kt	153 Mt
Importations	161 kt	1 819 kt	144 kt	
Recyclabilité	44% effectivement recyclé	46% effectivement recyclé	94 % effectivement recyclé	22% potentiellement recyclable
Offre / Demande	Variable selon le secteur	Demande > Offre	Demande >> Offre	Demande >> Offre

3.1.1 Types de gisements

PLASTIQUES

Les matières plastiques sont particulières, dans la mesure où elles sont multiples (sans être miscibles) et trouvent leur application dans de multiples produits. Ainsi, le gisement de matières secondaires est complètement diffus et sa collecte éventuelle (souvent assez partielle) implique de multiples circuits et possibilités de traitement en vue de leur utilisation.

De plus, les matières plastiques se présentent comme de véritables matériaux composites qui ont été adaptés à leur future utilisation, au moyen de différentes charges (ou additifs). Ces charges sont généralement ajoutées lors de la transformation, avec une vocation mécanique ou économique.

Le gisement de matières plastiques est donc très varié et mérite une vigilance particulière quant à leur utilisation après recyclage. De plus, il se situe en bonne partie à l'état d'emballages primaires en fin de vie auprès des ménages et est donc d'une qualité relativement basse par rapport à l'exigence industrielle.

Par ailleurs, les matières plastiques présentent la particularité de se dégrader physiquement dans le temps par un effet de vieillissement surtout lié à la lumière. Elles subissent également une perte de propriétés mécaniques de l'ordre de 10% lors de leur transformation, ce qui a pour conséquence pour le recyclage une limite d'incorporation, variable selon les applications.

METAUX (ACIER)

Les métaux – et en particulier l'acier – sont également présents dans beaucoup d'applications. Leur gestion à l'état de déchets est plus simple que pour les matières plastiques, avec une massification importante à proximité de la transformation. Les circuits de transformation sont également plus courts. Les métaux peuvent être plus ou moins alliés et ainsi représenter des familles qui sont miscibles entre elles après une phase d'homogénéisation, même si cela est souvent proscrit pour une question de qualité. Elles ne sont généralement pas chargées.

Le gisement des métaux implique donc une distinction nette entre les différentes matières, raison pour laquelle une orientation a été prise dans ce rapport sur l'acier. Une partie de ce gisement se situe au niveau ménager, avec une vigilance supérieure par rapport au niveau industriel quant au recyclage.

Les métaux ne présentent pas de dégradation physique notable lors de leur transformation. En conséquence, ils peuvent être utilisés indifféremment à l'état recyclé ou non et d'une manière infinie.

VERRE

Le verre possède un gisement assez concentré dans l'emballage (verre creux), représentant 80% de ce gisement, le reste étant constitué de verre plat, principalement issu du secteur de la construction. Ainsi, il est question de deux grands gisements issus des ménages et de la construction, avec des circuits différents mais tous deux relativement simples.

Ce matériau est relativement homogène en termes de composition, ce qui facilite son traitement. En revanche, les emballages possèdent différentes couleurs (blanc, vert et brun) qui constituent un critère important et impliquent un tri, soit en amont, soit en aval.

Le gisement de verre est donc assez peu contraignant en termes de recyclage. Cependant, il se situe en bonne partie à l'état d'emballages primaires en fin de vie auprès des ménages (surtout pour le verre creux) et se trouve donc d'une qualité relativement basse par rapport à l'exigence industrielle.

Le verre ne présente pas de dégradation physique notable lors de sa transformation. En conséquence, il peut être utilisé indifféremment à l'état recyclé ou non, et d'une manière infinie.

BETON

Le principal gisement de déchets de béton provient du BTP. Concernant les déchets du BTP, 80% des déchets viennent des TP et 20% du bâtiment. Concernant les déchets du bâtiment, 51% des déchets sont issus de démolition/déconstruction, 36% de rénovation, et 13% de construction neuve¹⁸.

Le volume de déchets de béton est d'environ 20 millions de tonnes ce qui représente 6% des déchets collectés de travaux publics, et 50% des déchets collectés du bâtiment¹⁹.

¹⁸ <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-direction-de-chantier-43824210/gestion-des-dechets-de-chantier-tba236/>

¹⁹ http://www.cerc-actu.com/upload/document/Dechets_et_recyclage_BTP_France.pdf

Les normes (NF EN 206/CN béton et NF EN 12 620 granulats pour béton) catégorisent les matériaux utilisés dans la construction selon différentes familles de matières : béton, produits en béton, mortier, éléments, de maçonnerie en béton, granulats non liés, pierres naturelles, granulats traités aux liants hydrauliques, un certain nombre d'indésirables tels que les verres, les enrobés, les briques et des polluants (plâtre, plastiques, bois, etc.).

Ces familles de constituants vont se retrouver – plus ou moins mélangées à d'autres matériaux - dans les différents types de déchets minéraux :

- Les déchets de béton : regroupant généralement les bétons armés et non armés ;
- Les produits en béton, les mortiers, et les éléments de maçonnerie en béton;
- Les mélanges de bétons, briques, céramiques... ;
- Et les terres et cailloux.

3.1.2 Tentative de quantification des flux

Il est intéressant de quantifier les différents flux de matières premières secondaires en présence aux différents stades pour pouvoir les confronter au besoin et à la demande (aux niveaux français et européen). La *Figure 18* montre respectivement la composition (camembert) et la quantité du gisement de déchets recyclables au niveau européen (tableau) :

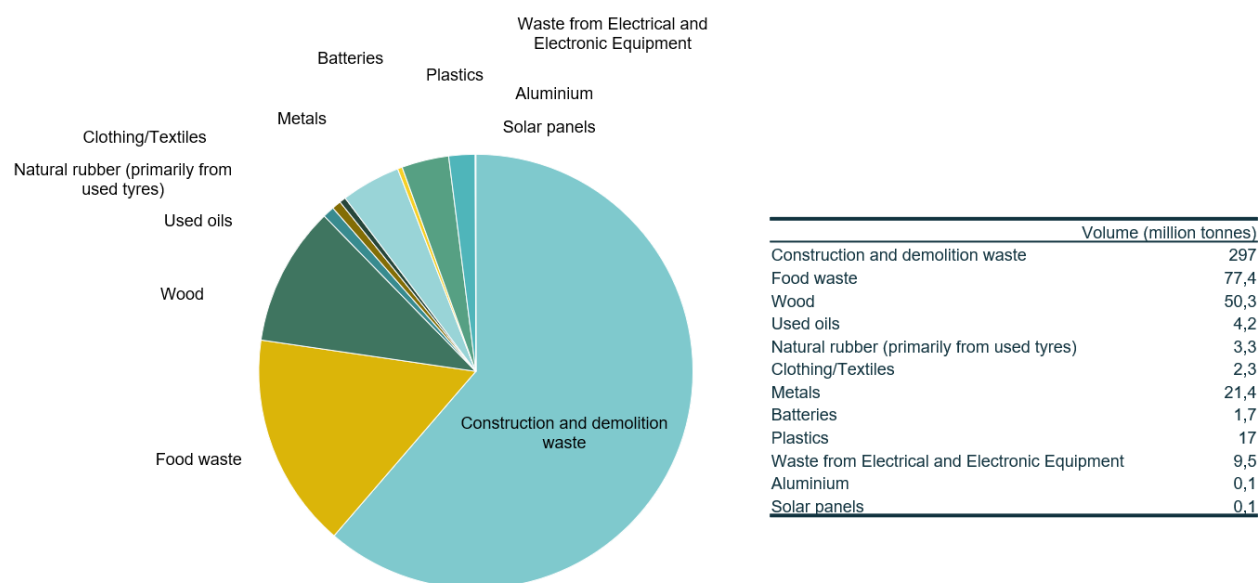


Figure 18 : Composition pondérale du gisement des déchets recyclables au niveau EU (Source : EEA)

Cette figure montre la grande prédominance des matériaux de construction, suivis des métaux et du bois. Les autres matériaux sont moins pondéraux mais susceptibles d'avoir une plus grande empreinte environnementale par leur transformation.

La *Figure 19* montre que la production de déchets suit le PIB (Produit Intérieur Brut) avec une nette inflexion des quantités produites au niveau européen en 2018. Toutefois, les quantités de déchets se situent désormais à un niveau inférieur, probablement en lien avec les efforts d'éco-conception.

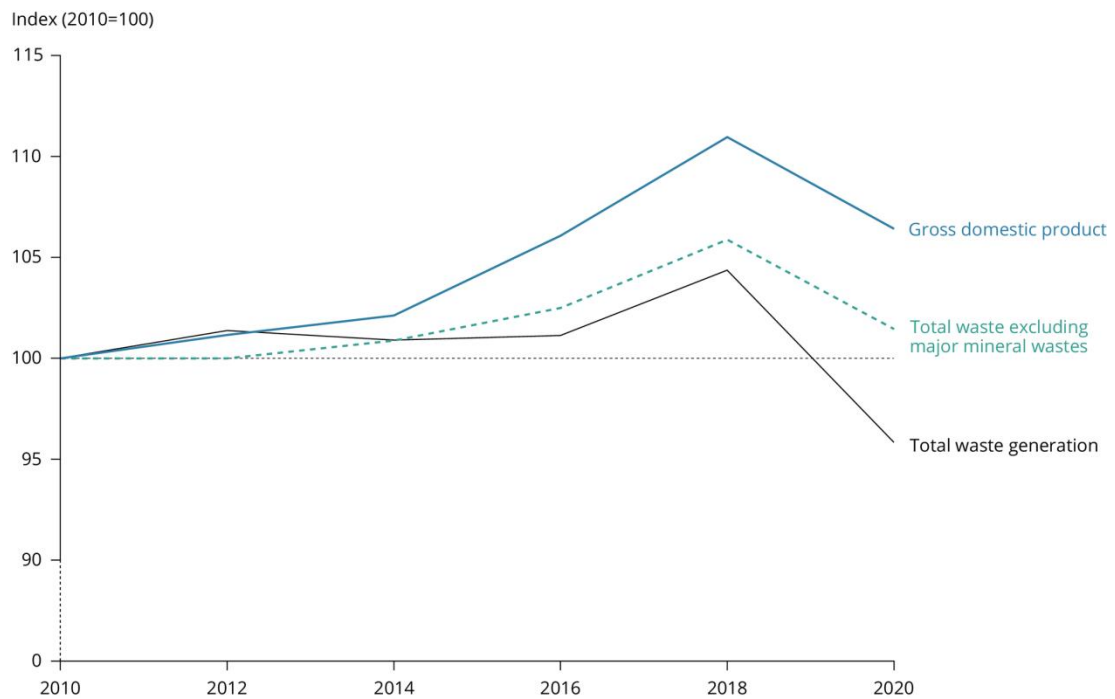


Figure 19 : Evolution récente des quantités de produits au niveau EU (Source : EEA²⁰)

La *Figure 20* suivante montre la production de déchets ménagers par habitant dans les différents pays de l'UE. L'évolution au cours de la dernière décennie est également présentée.

²⁰ <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/waste-generation-and-decoupling-2>

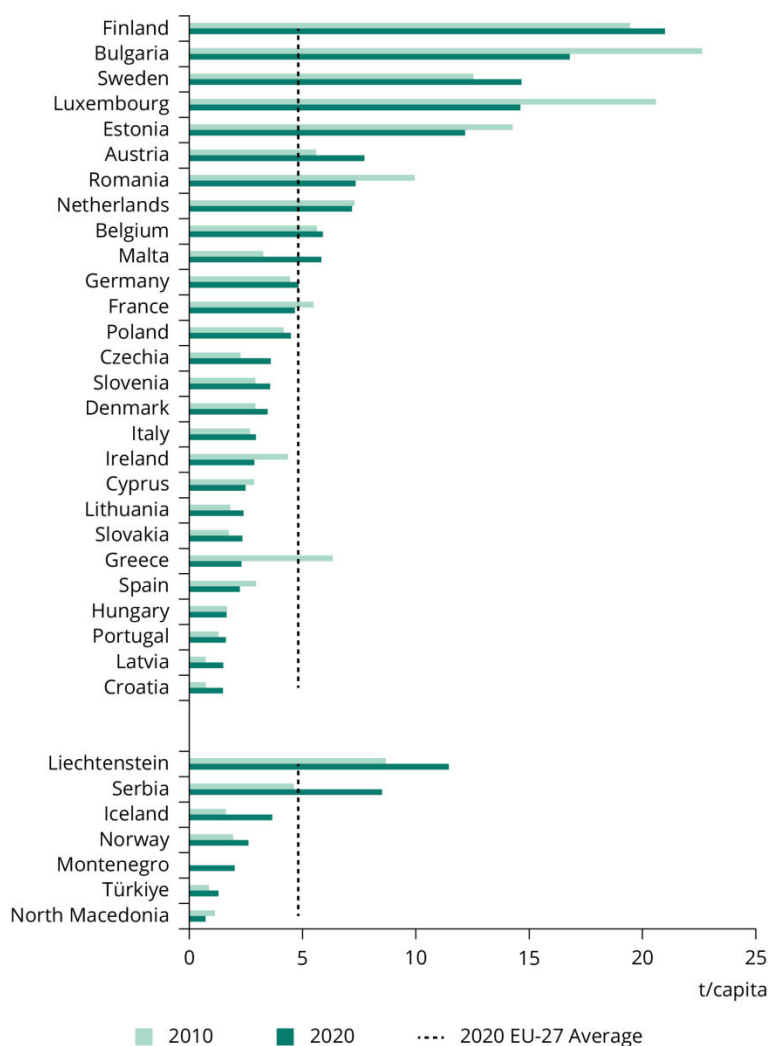


Figure 20 : Evolution de la production de déchets ménagers dans l'UE (Source : EEA²¹)

Les écarts entre les pays sont très élevés et montrent une véritable disparité. L'évolution est encore généralement positive, excepté dans la dizaine de pays où un effort de réduction existe.

PLASTIQUES

D'après le bilan national du recyclage de l'ADEME en 2019²², ce sont 1 428 t qui ont été collectées (dont 161 t importées), 1 019 t qui ont été triées pour 622 t qui ont été effectivement recyclées. Ainsi, le taux d'efficacité de la filière pour les matières plastiques n'est que de 61% à partir des matières triées et de 43% à partir des matières collectées.

Ces taux d'efficacité sont relativement bas et peuvent être expliqués par le fait qu'une grande partie des matières plastiques se trouve dans le gisement ménager, qui est, comme nous l'avons vu précédemment, de qualité moindre que les déchets industriels, ce à quoi s'ajoute la complexité liée à la multiplicité des matières.

Il peut être supposé que le taux d'efficacité du recyclage soit du même ordre de grandeur au niveau européen, contrairement au taux de collecte qui peut être bien différent. En effet, il existe une certaine homogénéité de la performance des procédés de tri, mais pas de la collecte.

²¹ <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/waste-generation-and-decoupling-in-europe>

²² ADEME, Chloé DEVAUZE, Alima KOITE, Anaëlle CHRETIEN, Véronique MONIER. 2021. Bilan National du Recyclage 2010-2019 - Évolutions du recyclage en France de différents matériaux : métaux ferreux et non ferreux, papiers-cartons, verre, plastiques, inertes du BTP et bois. 99 p.

METAUX (ACIER)

D'après le bilan national du recyclage de l'ADEME en 2019²², ce sont 2 310 t qui ont été collectées (dont 144 t importées) pour 2 162 t qui ont été effectivement recyclées. Ainsi, le taux d'efficacité de la filière pour l'acier est de 94%.

Ce taux élevé montre un bon niveau d'efficacité. Il peut être expliqué par une bonne qualité du gisement, qui reste en bonne partie d'origine industrielle.

Au niveau européen, il est difficile d'extrapoler ce taux d'efficacité, qui dépend du taux de collecte qui peut différer d'un pays à l'autre. La tendance peut en revanche être considérée en première approche.

VERRE

D'après le bilan national du recyclage de l'ADEME en 2019²², ce sont 13 558 t qui ont été collectées (dont 1 819 t importées) pour 6 236 t qui ont été effectivement recyclées. Ainsi, le taux d'efficacité de la filière pour le verre n'est que de 46%.

Ce taux plutôt bas montre un niveau d'efficacité assez faible. Il peut être expliqué par une basse qualité du gisement qui est en bonne partie d'origine ménagère, avec en sus la multiplicité des couleurs.

Comme pour les métaux, il est difficile d'extrapoler ce taux d'efficacité au niveau européen : celui-ci dépend du taux de collecte qui diffère d'un pays à l'autre, mais la tendance peut également être considérée en première approche.

BETON

Avec environ 228 millions de tonnes de déchets produit chaque année en France par le BTP en 2014²³, il s'agit de loin du plus gros gisement de déchets. 80% des déchets sont considérés comme des déchets inertes, certains pouvant être mobilisés dans la fabrication de granulats recyclés pour les bétons. La Figure 21 présente les flux potentiels de déchets recyclables définissant un taux de recyclabilité par catégorie de déchets. En effet, une catégorie de déchets ne peut être intégralement recyclable. Les taux retenus sont basés sur les suivis réalisés sur plateformes et sur des dires d'experts du domaine : 60% pour le béton, 30% pour les mélanges et 75% pour les graves et matériaux rocheux.

Au sein des terres et cailloux (environ deux tiers des inertes du BTP), il a été possible de distinguer une part recyclable baptisée graves et matériaux rocheux. Les différents flux de déchets identifiés sont aujourd'hui en grande partie déjà captés pour une mise en œuvre dans les applications routières. Le premier d'entre eux est réalisé sur les chantiers-mêmes : 71 Mt d'inertes comprenant majoritairement des terres (45 Mt) et mélanges à base de bétons, graves et matériaux rocheux (22 Mt au total). La proximité rend ces flux naturellement captifs du réemploi en travaux publics. De plus, les objectifs fixés par la loi de transition énergétique pour une croissance durable « 60% des matériaux d'une route devront être d'origine secondaire en 2020 », vont renforcer la nécessité de maintenir tous ces déchets accessibles pour ces travaux. De ce fait, le gisement potentiel pour la filière béton doit être évalué en ôtant la part des matériaux qui sont et resteront captifs pour les travaux routiers.

²³ <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/entreprises-du-btp-2275-millions-de-tonnes-de-dechets-en-2014>

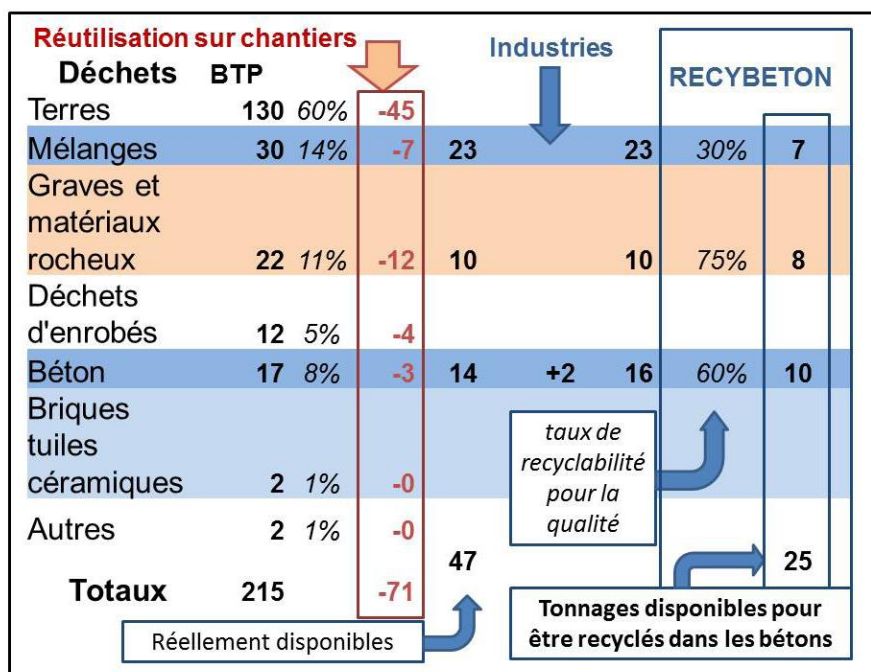


Figure 21 : flux potentiels de déchets recyclables pour les bétons – base 2014 (SOeS, CERC, UNICEM) (Source Rapport RECYBETON²⁴)

On comprend ainsi que le gisement global disponible pour les bétons est en fait limité à environ 25 Mt par an en France. Dans un modèle idéal où matières premières et déchets seraient répartis de manière uniforme sur l'ensemble du territoire, dans un calendrier des opérations et une configuration de travaux permettant de réutiliser tous les déchets inertes générés, le taux de substitution théorique serait de 22 % (25 Mt / 112 Mt granulats dans le bâtiment et le génie civil).

Différences de calcul des taux de recyclage au niveau européen :

Au niveau européen, il existe des divergences entre les pays dans les méthodes de calcul du taux de recyclage, notamment sur les déchets considérés comme effectivement recyclés. Ces divergences de calcul peuvent induire des biais dans la comparaison des taux de recyclage d'un pays à l'autre et incitent à être prudent en termes de comparaison.

Il existe trois niveaux de divergence possible :

- **L'exclusion des chutes** dans la définition du recyclage : au sens de l'ADEME et de l'UE, le fait d'utiliser des chutes de production n'est pas considéré comme du recyclage mais il n'est pas certain que tous les pays ne le considèrent pas ;
- **le point de comptabilisation**, c'est-à-dire le point à partir duquel les déchets sont considérés comme matière recyclable : plus ce point est situé en amont, moins la méthode est conservatrice, car des rebuts (matériaux sortant de la filière de recyclage) sont alors quantifiés comme recyclés. A ce sujet, il existe désormais une harmonisation européenne des points de comptabilisation pour les déchets d'emballage qui font l'objet d'une attention particulière ;
- **le mode d'enquêtes** auprès des acteurs : ce mode est généralement déclaratif mais peut être plus ou moins formel, ce qui induit plus ou moins de rigueur.

Aussi, il a été choisi d'utiliser d'abord les chiffres français qui font l'objet d'une vérification rigoureuse et harmonisée. Les chiffres européens sont par ailleurs moins disponibles.

²⁴ <https://www.actu-environnement.com/media/pdf/news-32485-recommandations.pdf>

3.1.3 Système de collecte collective

Pour les matériaux gisant dans les déchets ménagers, le système de collecte tend à être sélectif, avec séparation à la source des articles concernés (notamment des emballages) dans la plupart des pays d'Europe. Ainsi, le système de collecte sélective, qui commence par le tri à la source et se termine par un centre de tri spécialisé (et dans le cas des matières plastique peut faire face à la diversité des matières).

Les systèmes de collecte des autres gisements que le gisement ménager sont encore en cours de conception et de déploiement pour obtenir une certaine efficacité, en particulier grâce aux filières REP. La difficulté réside dans la répartition du territoire des gisements et l'adéquation avec le nombre et la localisation des plateformes de recyclage. Leur gisement s'avère en revanche moins complexe et implique donc moins de tri.

Selon les matériaux, des progrès significatifs de la collecte et du recyclage ont été enregistrés au niveau européen au cours des dernières années. Comme le montre le graphe ci-dessous, il existe en revanche une disparité importante selon les pays :

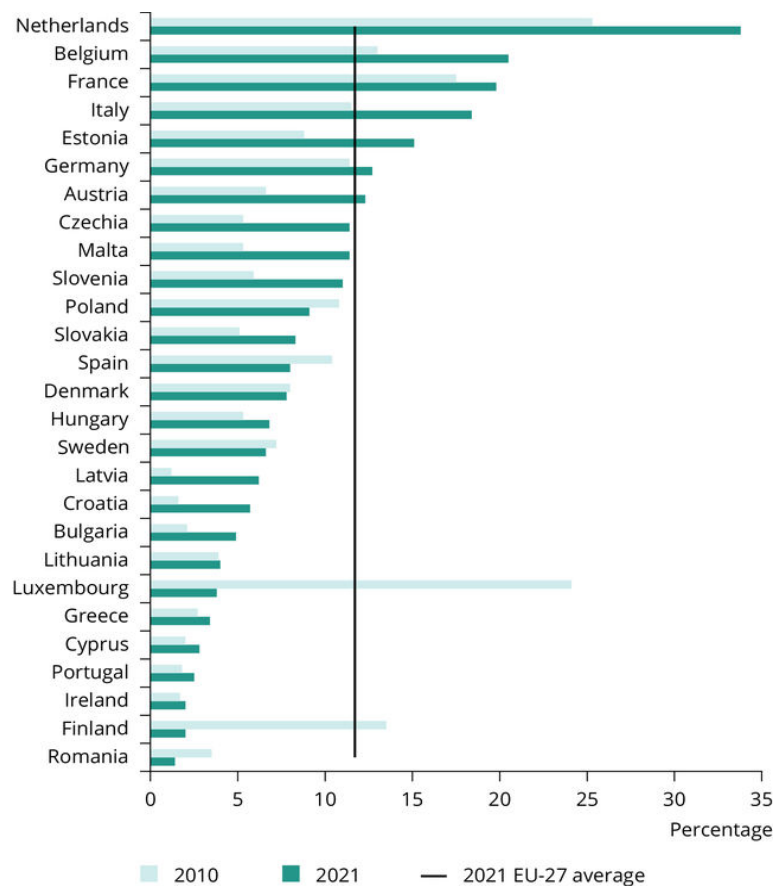


Figure 22 : Taux d'utilisation des matériaux recyclables par pays en 2010 et 2021

(Source : EEA²⁵)

En outre, la France se situe parmi les pays où les matériaux recyclables sont les plus utilisés. De façon générale, une nette progression peut être constatée pour la dernière décennie.

²⁵ <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/circular-material-use-rate-by-1>

3.1.4 Types de produits incorporant de la matière recyclée

L'usage de matières recyclées dans des produits est diverse, et ne représente qu'une fraction du produit final. Cette partie dépend de l'application, qui fixe alors le cahier des charges, mais aussi du matériau, dont le recyclage provoque plus ou moins une dégradation de ses propriétés, comme on l'a vu précédemment.

Les produits concernés sont assez diversifiés et peuvent être classés par secteur et par matériau recyclé, comme indiqué dans le Tableau 13 ci-dessous :

Secteur / Matériau	Plastiques				Verre	Mét Acier
	PE / PP	PET	PVC	PS		
Industrie de l'emballage	Sacs ; Bacs ; Barquettes ; Palettes	Bouteilles ; Barquettes	Bassines	Plateaux logistiques	Bouteilles ; Pots ; Verres	Boîtes de conserve
Industrie de transformation	Embouts pour bobines			Embouts pour bobines		
Industrie automobile	Planches AR		Bâches	Plateaux logistiques	Vitres	Pièces de moteur
Industrie textile	Films agricoles ; Embouts pour bobines	Vêtements				
Industrie de la construction	Tuyaux ; Planches ; Piquets ; Panneaux		Tuyaux ; Planches		Matériau isolant ; Fondations ; Carreaux	Fers à béton ; Poutrelles
Industrie de l'équipement	Clôture ; Mobilier urbain ; Jouets ; Outils		Moquettes ; Manches ; Rideaux	Cintres ; Pièces d'appareils ; Boîtiers	Ustensiles de cuisine	Outils ; Clous

Tableau 13 : Cartographie des applications incorporant de la matière recyclée par secteur

Il est notoire que les applications des matières plastiques recyclées sont plus diversifiées, du fait de leur multiplicité mais aussi de la variété de leurs technologies de transformation (injection, extrusion, extrusion-soufflage, thermoformage, rotomoulage).

Les métaux et le verre impliquent quant à eux des technologies d'extrusion et de moulage vers des applications plus restreintes.

Considérant ces différentes applications, il est possible d'établir des taux d'incorporation moyen pour les différents matériaux. En France, il est question selon l'ADEME²⁶ d'environ 10% pour les matières plastiques (uniquement PE/PP, PET, PVC), de 61% (en hausse) pour le verre et de 47% (en baisse) pour l'acier : ces chiffres donnent une bonne idée du niveau de développement des filières.

Concernant le béton, la majorité des flux de déchets sont orientés vers le remblayage de carrière ou sous-cyclage en construction routière, pour des raisons économiques. L'utilisation de granulats recyclés pour la réalisation de bétons de structure peut se faire selon deux modalités différentes :

- L'incorporation de granulats recyclés purs dans la formulation des bétons selon une proportion choisie dans la formule ;
- L'incorporation d'un prémélange qui se définit par le mélange de granulats naturels et de granulats recyclés réalisé sur plateforme de recyclage ou sur une carrière selon une proportion fixée par le producteur.

Qu'il s'agisse de granulats recyclés purs ou de prémélanges, les granulats incorporés dans un béton doivent être marqués CE et à ce titre remplir toutes les exigences relatives au marquage CE des granulats.

Selon différentes sources, il est possible d'incorporer jusqu'à 50% de granulats recyclés dans les bétons de construction. Ces valeurs varient énormément selon les types de classe de béton.

²⁶ ADEME, IN NUMERI. 2022. Déchets Chiffres clés, Édition 2023, 84 pages.

3.1.5 Demande de matières secondaires

Pour les différents matériaux, la demande de matières secondaires semble avoir toujours été plus ou moins supérieure à l'offre selon la conjoncture économique. Cette situation est plutôt saine d'un point de vue économique mais peu satisfaisante d'un point de vue technique ou environnemental.

Au niveau européen, le graphe suivant montre l'augmentation assez régulière du taux de circularité de l'utilisation des matériaux (Circular Material Use), en lien direct avec une réduction de la consommation des matériaux, le taux de recyclage restant sensiblement stable à 7%. Jusqu'alors, le progrès de ce taux de circularité ne serait ainsi dû qu'à une réduction de la consommation des matériaux concernés.

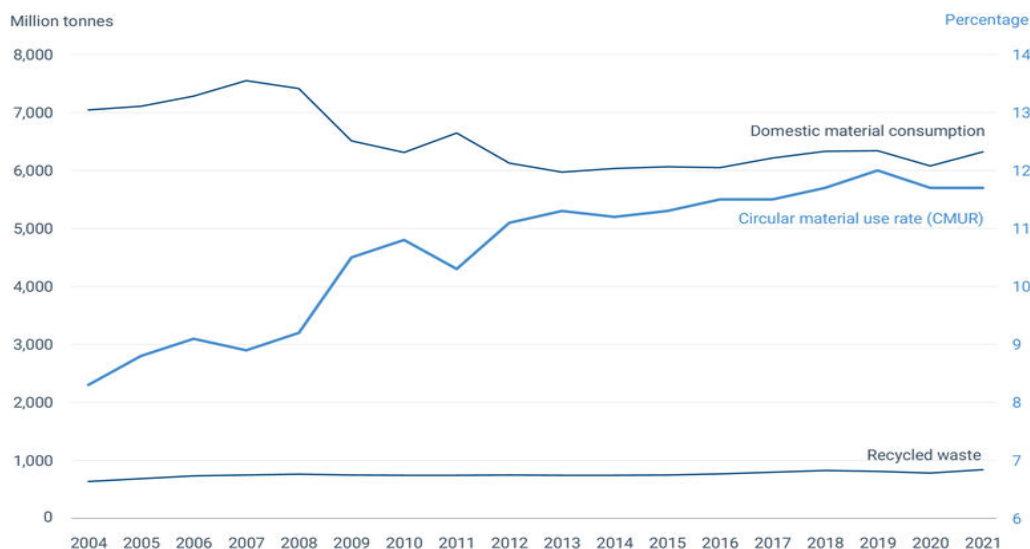


Figure 23 : Taux de circularité par rapport à la consommation de matière (Source : EEA²⁷)

De façon générale, il peut être question de la demande effective, qui se concrétise et est évaluée via les achats, ainsi que de la demande potentielle, évaluée quant à elle à partir des taux optimaux d'incorporation. La demande potentielle devrait pouvoir être estimée en France à partir des analyses de la présente étude et ainsi servir davantage de repère.

Il peut également être pertinent de distinguer la demande brute liée aux marchés, nécessairement influencée par les activités économiques, et la demande spécifique qui se rapporte davantage aux taux d'incorporation. En première approche, il est ici surtout question de la demande brute.

En outre, des valeurs de demande potentielle pour chacun des produits identifiés dans le Tableau 13 pourront être obtenues en appliquant le seuil maximal d'incorporation du matériau à leur niveau de production en France. Leur somme donnera la demande potentielle en France pour chacun des matériaux recyclés, ce qui pourra servir d'objectif à terme.

PLASTIQUES

Pour les matières plastiques, il existe une dépendance assez nette au cours du prix du pétrole, ce qui détermine en bonne partie le prix des matières vierges alors que le prix de revient des matières secondaires reste sensiblement constant et constitue donc un seuil financier. Le taux d'utilisation des matières recyclées devrait donc normalement augmenter avec la hausse actuelle du cours du pétrole. L'écart entre l'offre et la demande est, de plus, assez différent selon les secteurs d'application comme le montre le graphe ci-dessous :

²⁷ <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/development-of-the-circular-material>

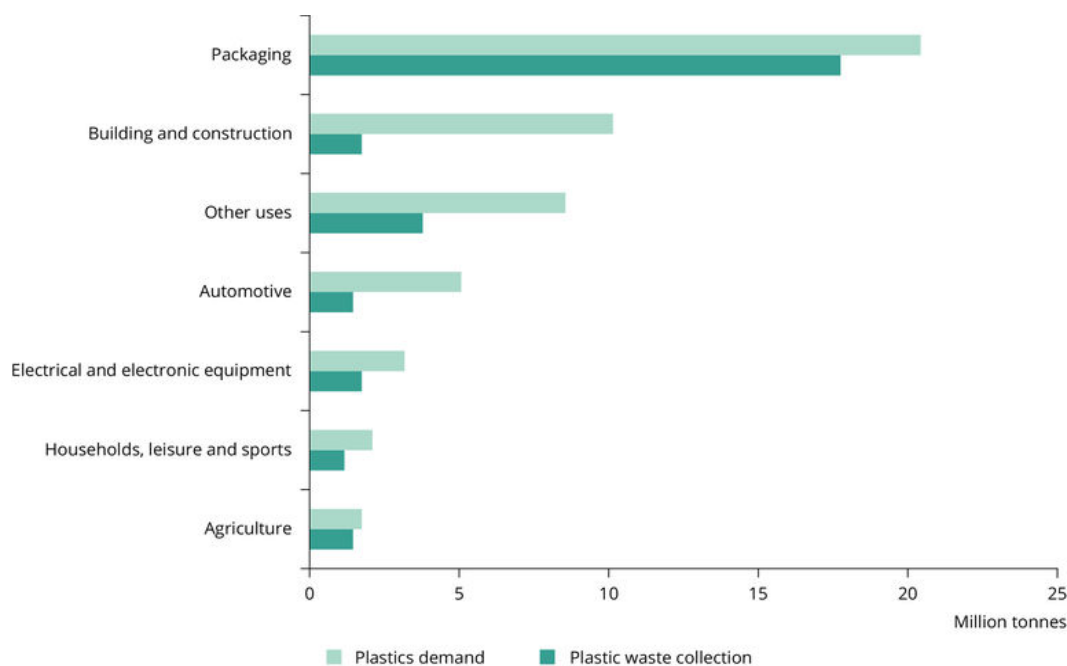


Figure 24 : Demande de matières plastiques recyclées par rapport à la collecte de déchets plastiques (Source : EEA²⁸)

En outre, l'avance du secteur de l'emballage peut être constatée, avec une offre se rapprochant de la demande (sans prise en compte du facteur d'efficacité).

Selon des entretiens réalisés au niveau de l'industrie de la plasturgie et de la récupération des déchets, la demande n'est parfois pas si importante, du fait d'une méconnaissance de l'offre. Elle pourrait donc être soutenue par une meilleure communication.

METAUX (ACIER)

Compte tenu de la forte consommation énergétique à la faveur du recyclage, le prix de l'énergie est un facteur influençant l'utilisation d'acier recyclé. Lors des périodes où le prix de l'énergie est élevé, il semble toutefois que le seuil de disponibilité locale de la matière soit assez rapidement atteint comme le montre une tendance à l'importation.

Selon des entretiens réalisés au niveau de l'industrie de transformation de l'acier, et de la récupération des déchets, la demande est en effet relativement forte, en lien avec les économies permises par l'utilisation de matière recyclée. Elle peut alors activer l'importation de déchets d'emballage en acier, y compris depuis l'extérieur de l'Europe, en fonction de leur prix.

VERRE

Comme pour l'acier, la forte consommation énergétique liée au recyclage du verre implique que le prix de l'énergie soit un facteur influençant l'incorporation de calcaire. Lors des périodes où le prix de l'énergie est élevé, une relance est ainsi possible.

Selon des entretiens réalisés au niveau de l'industrie de transformation du verre et de la récupération des déchets, la demande est relativement forte, en lien avec les économies permises par l'utilisation de matière recyclée. De façon générale, elle est assez dépendante de certains marchés comme ceux du bâtiment (actuellement en crise) et ceux de la consommation de boissons (actuellement prospères) et elle se limite à une certaine proximité au centre de transformation pour une question de prix, en lien avec le poids des emballages.

²⁸ <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/demand-for-plastic-versus-plastic>

Modes de variation de l'offre et de la demande :

L'offre et la demande de matière recyclée pour les différents matériaux, qui peuvent être déterminantes à plusieurs égards, sont étroitement liées à la situation économique du pays concerné. En outre, il s'agit d'une offre provenant à la fois des déchets ménagers et industriels et d'une demande purement industrielle.

L'offre va généralement être beaucoup plus stable concernant les déchets ménagers, car elle correspond beaucoup aux emballages liés à une consommation peu encline à la variation. L'offre, si elle dépend des déchets industriels, peut s'avérer plus volatile selon les secteurs car pouvant dépendre de la production. A titre d'illustration pendant la récente période épidémique, l'offre de verre s'est maintenue car provenant principalement des ménages.

La demande est quant à elle directement liée à l'activité économique des secteurs, ainsi qu'à sa volonté éventuelle de s'orienter vers davantage de matière recyclée, celle-ci étant encore souvent très influencée par des critères économiques en fonction des cours des matières vierges (ex. : prix du pétrole pour les matières plastiques), ce qui la rend beaucoup plus conjoncturelle et complexe. Dans l'exemple du verre au cours de l'épidémie, la demande a eu tendance à chuter car elle est issue de différents secteurs (pas seulement agro-alimentaire) mais aussi à monter compte tenu du prix de revient moins élevé du calcin.

En première conséquence, il est possible de considérer qu'un matériau plus dépendant de la production ménagère comme le verre a un rapport entre l'offre et la demande qui est plus stable et local par son offre - et donc plus stratégique - qu'un matériau comme l'acier qui dépend davantage de la production industrielle pour sa fourniture. Les marchés de la matière recyclée sont forcément assez volatiles car dépendant de nombreux facteurs économiques.

Des niveaux relatifs de l'offre et de la demande dépend ainsi le niveau de tension existant et partant le facteur économique et souvent une incidence plus ou moins forte sur l'environnement. Le cas échéant, cette tension pourra même déboucher sur une importation conséquente de matière recyclée qui va dans le sens d'un impact plus important.

3.1.6 Importation de matières secondaires

Les matières secondaires importées sont susceptibles d'avoir un impact environnemental plus important du fait de leur transport, mais aussi du fait de leur qualité moindre faute de respect du cahier des charges. C'est pourquoi il est intéressant d'essayer de les quantifier tant au niveau européen qu'au niveau français.

Au niveau européen, il semble que la tendance des dernières années soit à l'augmentation des quantités importées, pour satisfaire la demande de matières secondaires. Le graphe ci-dessous qui présentent les chiffres de l'import-export aux frontières de l'UE le confirme :

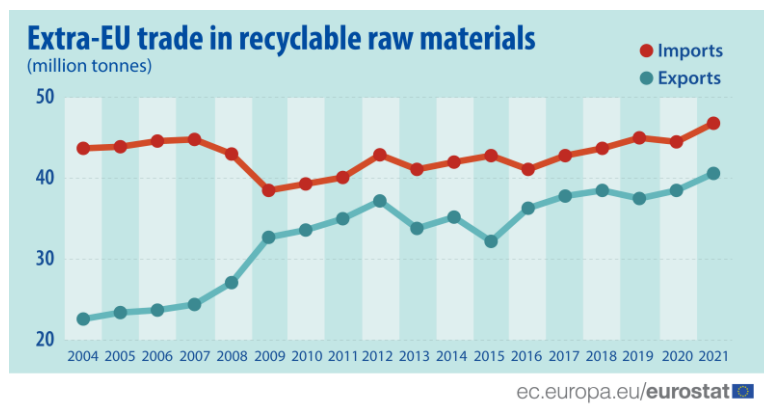


Figure 25 : Importation et exportation de matières recyclées depuis l'extérieur de l'UE (Source : Eurostat²⁹)

Au total, ce sont donc environ 45 millions de tonnes de matériaux qui sont importés chaque année dans l'UE. Rapportée aux 6 000 millions de tonnes qui sont consommées chaque année, cette quantité importée représente 8% et n'est donc pas négligeable.

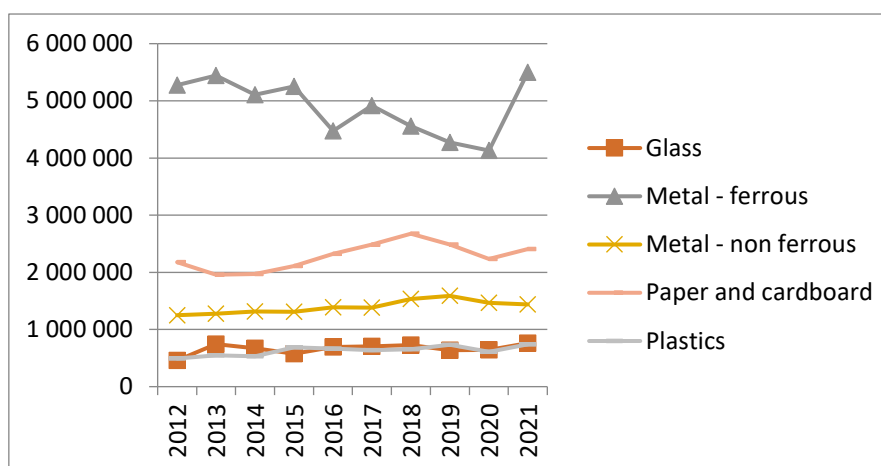


Figure 26 : Tonnages importés par matériau dans l'UE (en tonnes par an) (Source : Eurostat)

Le détail par matériau a pu être obtenu directement à partir des chiffres d'importation d'Eurostat. Il montre notamment :

- Une nette augmentation de l'importation de métaux ferreux (acier) au cours des dernières années, qui peut être expliquée par le ralentissement économique lié à la pandémie qui a réduit la production de déchets industriels ;
- Une tendance à une relative stabilité de l'importation pour le verre et les plastiques, qui ont toujours pu être approvisionnés par les collectes sélectives issues des ménages.

Quant à elle, la France a exporté 12 Mt de matières premières de recyclage ou déchets valorisables en 2021 et en a importé 3,3 Mt selon le bilan dressé par le ministère de l'Environnement³⁰. Les importations ont connu une baisse de 2 % par an en moyenne sur la période 1999-2021, ce qui représente une évolution positive des points de vue économique et environnemental.

Les importations françaises ne sont donc pas négligeables mais ont tendance à se réduire. Il n'est donc pas certain que l'importation soit un facteur notable pour notre étude, mais il doit être regardé dans la mesure de la disponibilité des données.

²⁹ <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220510-1>

³⁰ <https://www.notre-environnement.gouv.fr/actualites/breves/article/quel-est-le-bilan-des-echanges-internationaux-de-matieres-premieres-de>

3.2 Description des filières de recyclage par matériau

Pour mieux comprendre les filières de recyclage, il est utile de les décrire pour les différents matériaux et selon différents critères.

3.2.1 Accessibilité de la matière recyclée

De façon générale, les filières ont plutôt intérêt à avoir un accès facile aux matières recyclées pour deux raisons :

- Une raison stratégique, sachant que les gisements de déchets sont généralement plus proches que ceux de matière vierge ;
- Une raison économique, car les matières recyclées sont susceptibles d'être plus économiques ou aux cours plus stables.

En outre, l'accessibilité peut avoir une incidence environnementale car elle vient concrétiser la filière de recyclage.

La notion d'accessibilité est ainsi importante et de fait souvent abordée par les interlocuteurs professionnels, ce qui est rapporté ci-dessous pour les différents matériaux.

PLASTIQUES

Les matières plastiques ont une accessibilité qui est d'abord limitée par la collecte sélective des déchets ménagers qui a du mal à se généraliser à l'ensemble des matières malgré des efforts d'éco-conception des emballages. Elle est par ailleurs limitée par leur qualité en fonction des cahiers des charges de l'industrie.

Ainsi, il est fréquent de rencontrer des interlocuteurs industriels qui n'utilisent pas autant de matière recyclée qu'ils le souhaiteraient. Il en existe même qui ne considèrent pas encore cette éventualité faute d'accessibilité.

METAUX (ACIER)

Un problème d'accessibilité à l'acier recyclé existe dans la mesure où une partie du gisement est immobilisé dans des applications à longue durée de vie, notamment dans le secteur de la construction et du transport. L'accès se fait par ailleurs au niveau ménager, avec les contraintes précédemment évoquées sur la qualité.

La demande ne semble ainsi pas être satisfaite dans l'industrie de transformation de l'acier. Pour augmenter ses bénéfices et réduire son impact environnemental, elle est ainsi tentée par l'importation de déchets étrangers.

VERRE

Une grande partie du verre recyclé est originaire des déchets d'emballages ménagers et la plupart (80%) est issue d'une collecte par apport volontaire selon la filière REP (filières à responsabilité élargie des producteurs) en France. L'accessibilité est donc réduite par le manque de performance du système de collecte sélective et son aspect volontaire qui est limitatif.

De fait, il semble qu'un meilleur accès serait souhaité par la profession, qui en bénéficierait probablement sur un plan économique. Elle pourrait ainsi également réduire son impact environnemental, en lien avec sa consommation énergétique.

BETON

La production de granulats recyclés pour fabriquer de nouveaux bétons est réalisée principalement sur des plateformes de recyclage, à partir de matériaux inertes issus des chantiers de déconstruction du bâtiment et des travaux publics.

Les flux de déchets sont très inégalement répartis sur le territoire (*Figure 27*) avec des pratiques différentes : une douzaine de zones urbaines concentre les principales ressources en matériaux de démolition. Elles constituent des zones les plus favorables au recyclage et peuvent doper l'approvisionnement en granulats recyclés dans le secteur du béton.

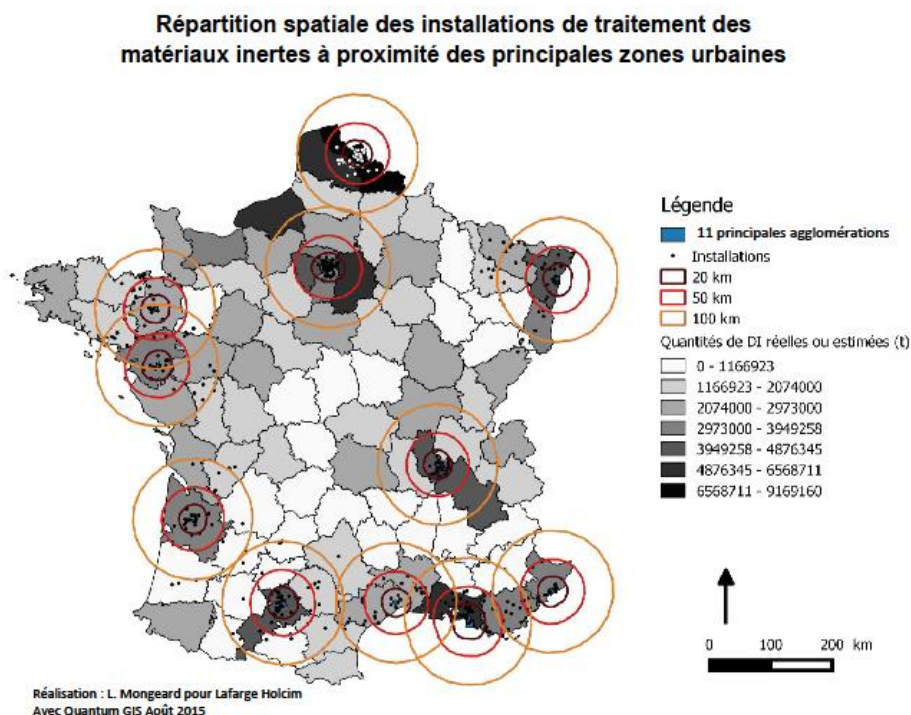


Figure 27 : localisation des plate-formes de recyclage sur le territoire national (Source : rapport RECYBETON²⁴)

3.2.2 Etapes principales et point de substitution

Les principales étapes des filières de recyclage sont décrites ci-dessous et un point de substitution est proposé à des fins de méthodologie.

PLASTIQUES

Cf. organigramme en Annexe 3-A : Organigramme de la filière de recyclage des matières plastiques

La filière de recyclage des matières plastiques est constituée de trois grandes étapes avant la production :

- Triage à la source et en centre de tri,
- Transformation par broyage et lavage ;
- Granulation par extrusion.

Cette filière implique ainsi normalement au moins trois sites qui peuvent être distincts (le broyage, le lavage et la granulation peuvent avoir lieu sur le même site).

Le cas échéant si l'état broyé est approprié, la dernière étape peut ne pas être réalisée. Le produit issu de la filière et utilisé comme matière première secondaire est donc soit le granulats soit le broyat.

Afin de bien considérer toute la matière recyclée, le point de substitution proposé (indiqué par une croix entourée sur l'organigramme) est celui de l'approvisionnement en matière broyée. Ce point est celui généralement retenu pour la comptabilisation des matières recyclées.

METAUX (ACIER)

Cf. organigramme en Annexe 3-B : Organigramme de la filière de recyclage de l'acier

La filière de recyclage des métaux est constituée de trois grandes étapes avant la production :

- Triage à la source et en centre de tri ;
- Transformation par surtriage et broyage ;
- Fusion et moulage ou extrusion.

Cette filière implique ainsi normalement au moins trois sites qui peuvent être distincts (le broyage et la fusion ont souvent lieu sur le même site).

Une seconde branche existe en amont avec la transformation des mâchefers issus de l'incinération et contenant une partie métallique. Ceux-ci font l'objet d'un traitement particulier de séparation de l'acier avant un broyage pour déboucher sur un autre type d'acier secondaire.

Afin de considérer toute la matière recyclée, le point de substitution proposé (indiqué par une croix entourée sur l'organigramme) est celui de l'approvisionnement en matière avant fusion sur les deux branches de la filière. Ces points sont ceux généralement retenus pour la comptabilisation des matières recyclées.

VERRE

Cf. organigramme en Annexe 3-C : Organigramme de la filière de recyclage du verre

La filière de recyclage du verre est constituée de trois grandes étapes avant la production :

- Triage à la source et en centre de tri ;
- Transformation par surtriage et broyage ;
- Fusion et moulage

Cette filière implique ainsi normalement au moins trois sites qui sont généralement distincts.

Une seconde branche existe en aval avec l'orientation sur la production de sable de silice. Toutefois, la transformation est similaire à celle de la branche principale avec une dernière étape constituée d'un traitement spécifique sans fusion.

Afin de considérer toute la matière recyclée, le point de substitution proposé (indiqué par une croix entourée sur l'organigramme) est celui de l'approvisionnement en matière avant traitement final sur les deux branches de la filière. Ces points sont ceux généralement retenus pour la comptabilisation des matières recyclées.

BETON

Cf. organigramme en Annexe 3-D : Organigramme de la filière de recyclage du BETON

Du fait de la diversité et de l'ancienneté des ouvrages déconstruits, la composition de ces matériaux inertes est variée, et si certains peuvent être valorisés en tant que granulats recyclés pour bétons, d'autres ne peuvent pas s'inscrire dans ce processus compte tenu de leur impureté, de leur variabilité ou de leur hétérogénéité, engendrant des risques d'apparition de défauts d'aspect, voire de désordres ultérieurs.

Il convient donc de procéder à une déconstruction maîtrisée et un tri sélectif associés à la mise en place d'une traçabilité afin de s'assurer que les matériaux inertes valorisables seront pris en charge et acheminés vers la plateforme de recyclage.

A l'entrée de celle-ci, l'acceptation des chargements est conditionnée à la vérification de l'intégrité de l'ensemble des documents (dont ceux relatifs à la traçabilité) et à un contrôle visuel des bennes. Les chantiers de déconstruction du BTP concernent tout type d'ouvrages, ce qui implique que les constituants des matériaux inertes sont variés. S'ensuit une suite d'opérations de tri, nettoyage et broyage relevant soit du périmètre de la gestion des déchets, soit du périmètre de la valorisation pour l'obtention de granulats recyclés, avec la production de co-produits ciblés pour d'autres voies de valorisation (ex. remblai).

Afin de considérer toute la matière recyclée, le point de substitution proposé (indiqué par une croix entourée sur l'organigramme) est celui de l'approvisionnement en matière avant traitement final et après élimination des principaux refus de tris. Certaines étapes sont énergivores (concassages, broyage) et d'autres consommatrices d'eau (criblage sous eau et lavage). Une étape supplémentaire de recarbonatation peut intervenir en fin de chaîne.

3.2.3 Aspects logistiques

Les aspects logistiques des filières sont souvent négligés, alors qu'ils peuvent représenter un élément important de leur empreinte environnementale. En effet, les différentes étapes présentées ci-dessus seront d'autant plus importantes qu'elles ne sont pas effectuées sur le même site et que ces sites sont plus ou moins distants (y compris à l'étranger) : il sera ainsi toujours préférable d'opter pour une filière courte avec un transport limité.

Des commentaires sont faits ci-dessous sur ces aspects pour les différents matériaux sur la base des organigrammes des filières.

PLASTIQUES

La filière plastique est la plus morcelée, surtout si une granulation est effectuée sur un site tiers, de type « compoundage », pour apprêter la matière à son emploi. Même si la matière est assez peu pesante, le transport est généralement important et donc contributif à l'empreinte environnementale.

Une préférence pourra évidemment être donnée à la filière en deux maillons (sans granulation) pas seulement pour une raison logistique. Autrement, il pourra au moins être recherché une chaîne de valeur sur seulement deux sites.

METAUX (ACIER)

La filière de l'acier est relativement directe en aval, avec une massification et un broyage ayant souvent lieu sur le site de traitement final, en lien avec la densité du matériau. En amont, la filière issue des déchets ménagers est classique tandis que la filière des déchets industrielle peut être plus complexe et moins connue.

Une préférence pourra être accordée aux filières les plus traçables et les plus courtes en amont. Le cas échéant, une centralisation sur le site de production pourra aussi être favorisée.

VERRE

La filière du verre est peu directe puisqu'elle implique toujours trois étapes (ou trois maillons), généralement réalisées sur trois sites distincts pour les déchets ménagers qui sont majoritaires. Toutefois, la localisation de ces sites semble généralement optimisée par rapport au lieu de transformation final, afin de réduire le transport.

Compte tenu de l'unicité du modèle, peu de latitude existe pour limiter l'impact du transport. Seul un calcul de la distance de transport peut servir de critère, comme pour les autres filières.

BETON

La filière de recyclage du Béton réunit de nombreux acteurs dispersés sur le territoire. La réalisation d'un maximum d'étapes de traitement et de valorisation des déchets sur chantier est un élément clef, permettant de limiter le co-transport d'autres matières, qui seront elles-mêmes valorisées dans d'autres filières. Pour limiter l'impact du transport, certaines études évoquent des projets pilotes reposant sur la mise à disposition d'une unité mobile de traitement.

3.2.4 Facteurs techniques à incidence environnementale

Dans les procédés utilisés pour la transformation des déchets en matières premières secondaires prêtes à l'emploi dans l'industrie, il existe plusieurs contraintes techniques impliquant souvent une conséquence sur les impacts environnementaux. Au travers de l'expérience acquise, d'entretiens avec des professionnels et de la bibliographie scientifique, il a été possible d'en identifier et d'en qualifier les plus significatives et ainsi de mettre en évidence certains critères.

Ces contraintes susceptibles d'avoir une incidence environnementale sont présentées ci-dessous, par matériau, avec leurs conséquences possibles, ainsi que de premières recommandations.

PLASTIQUES

COMPLEXITE DU TRI DES DECHETS PLASTIQUES D'ORIGINE MENAGERE DONT LA PERFORMANCE EST UN FACTEUR IMPORTANT

En relation avec la multiplicité de leur nature chimique et leur courante immiscibilité, les matières plastiques doivent faire l'objet d'un tri relativement complexe qui a fait l'objet de plusieurs innovations (ex. : tri optique). Comme la qualité de la matière recyclée est déterminante, la performance du tri est un critère majeur des points de vue technique et environnemental, impliquant une attention particulière, en particulier lorsqu'elle provient de déchets ménagers.

IMPORTANCE DU TYPE DE MATIERE EN LIEN AVEC LE POINT DE FUSION

Le point de fusion différant en fonction du type de matière plastique, il s'agit donc d'un paramètre qui va déterminer la consommation énergétique du processus de transformation : les températures de fusion des matières usuelles vont d'une centaine de degrés Celsius pour les polyoléfinés (PE, PP) à environ 260 °C pour le PET (le PS étant à environ 160°C).

Un autre paramètre notable, dépendant également du type de matière plastique, concerne le retrait qui rend la transformation plus difficile à maîtriser et implique souvent un pourcentage plus important de rebus de fabrication.

DEPENDANCE DE L'HISTOIRE DES MATIERES EN STOCK PAR RAPPORT A LEUR VIEILLISSEMENT ET A LEUR DEGRADATION

De façon générale, les matières plastiques sont assez sensibles à l'effet du temps, notamment lorsqu'elles sont soumises aux UV qui ont des conséquences sur leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques.

Il importe donc déjà de connaître la provenance et l'histoire des déchets plastiques, et d'intégrer ces paramètres lors de l'usage qui sera fait de ces matières afin de l'optimiser, ce qui n'est pas toujours évident compte tenu de leur faible traçabilité.

IMPORTANCE DU GRADE DES DIFFERENTES MATIERES (MFI) POUVANT IMPLIQUER UNE ETAPE SUPPLEMENTAIRE DE COMPOUNDAGE

Concernant l'usage de la matière recyclée, un paramètre crucial pour sa transformation concerne le grade, déterminé par l'indice de fluidité (MFI). Compte tenu des origines parfois variées des déchets plastiques, en lien avec leur disponibilité, il peut être important de passer par une étape supplémentaire de compoundage avec un objectif d'homogénéisation voire de modification de l'indice de fluidité. Ceci va néanmoins engendrer une conséquence sur l'impact environnemental de la filière, en ajoutant une étape de fusion et de transport de la matière.

IMPORTANCE DE LA QUALITE DU TRI POUR LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DANS LE CAS D'UN RECYCLAGE PRIMAIRE

La publication « Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach »³¹ indique que les impacts environnementaux du recyclage, notamment primaire, sont hautement dépendants de la qualité du tri.

En effet, une moindre qualité peut impliquer plusieurs étapes supplémentaires de dépollution, à l'origine d'une augmentation des impacts environnementaux.

UTILISATION DE PROCESSES COMPLEXES PERMETTANT L'INCORPORATION DE MATIERE RECYCLEE COMME LA CO-EXTRUSION OU LA BI-INJECTION

L'incorporation de matière recyclée dans certains produits aux fonctionnalités complexes peut impliquer la mise en œuvre de technologies sophistiquées, permettant la séparation des matières vierges et recyclées, comme la co-extrusion ou la bi-injection. Or, ces technologies sont généralement à l'origine d'une immobilisation plus importante de la machine, ainsi que d'une consommation énergétique plus élevée lors de la transformation, ce qui tend à en augmenter les impacts environnementaux.

AJOUT D'ANTI-OXYDANTS ET DE PIGMENTS VOIRE DE PEINTURE EMPECHANT LE RECYCLAGE POUR RETABLIR LA COULEUR DES MATIERES RECYCLEES

La dégradation des couleurs des matières issues de déchets (exemple du jaunissement du PET recyclé), qui est fonction de la présence de particules, mais aussi la simple hétérogénéité des gisements, est parfois compensée par un ajout d'anti-oxydants pour le blanchiment de la matière (10% oxyde de titane), suivi de l'utilisation de pigments supplémentaires. Ces pratiques concomitantes, qui tendent à alourdir le bilan environnemental du recyclage, devraient être limitées par une plus grande vigilance en amont.

³¹ Schwarz, A. E., Ligthart, T. N., Bizarro, D. G., De Wild, P., Vreugdenhil, B., & Van Harmelen, T. (2021). Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach. *Waste Management*, 121, 331-342.

UTILISATION DE SUBSTANCES DANGEREUSES (CF. REACH³²) : ADJUVANTS ORGANO-METALLIQUES PERSISTANTS

Certaines applications plastiques peuvent nécessiter l'utilisation de substances dangereuses (cf. REACH - Registration, Evaluation and Authorisation of règlement européen concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances) comme les adjuvants organo-métalliques persistants, qui peuvent avoir une incidence sur l'application ultérieure et induire des impacts environnementaux plus élevés. C'est notamment le cas des retardateurs de flamme bromés (RFB) ou de stabilisants (Sn et Zn) présents dans les matières plastiques issues des D3E (déchet d'équipement électrique et électronique) ou des VHU (Véhicules Hors d'Usage - cycles longs).

Intérêt potentiel du recyclage physico-chimique :

Le recyclage considéré dans la présente étude est celui qui correspond à une transformation mécanique des matériaux issus des déchets, communément appelé « recyclage mécanique ». Par opposition, il existe un « recyclage chimique » et un « recyclage physique » correspondant à différents procédés dont beaucoup sont encore en cours de développement et d'implantation.

Ces procédés physico-chimiques se distinguent principalement du recyclage mécanique par une dégradation très faible des molécules, ce qui constitue un critère important de l'intérêt du recyclage, car les matériaux conservent alors bien leurs propriétés techniques. Ces procédés vont de la dissolution (ou solvololyse) qui est purement physique, jusqu'à la dépolymérisation ou la gazéification qui permettent de remonter jusqu'au monomère, la pyrolyse n'étant pas considérée au niveau européen comme une forme de recyclage mais plutôt de valorisation énergétique.

Potentiellement, l'intérêt d'un point de vue environnemental de tels procédés par rapport au recyclage mécanique se situe aux niveaux suivants :

- une faible dégradation des microstructures de la matière, induisant une plus grande propension à utiliser indifféremment 100% de matière « recyclée » et une meilleure potentialité de recyclage ultérieur,
- un faible besoin de consommation de charges additionnelles pour compenser certains manques de propriétés,
- une économie d'échelle du fait de la capacité importante des installations à mettre en œuvre, ce qui permet un impact spécifique assez faible,
- une certaine simplicité de transformation sur un même site, d'où un moindre impact logistique.

En revanche, il ne faut pas oublier qu'ils impliquent davantage d'étapes de production pour revenir à une matière plastique avant sa transformation, qui alourdissent nécessairement ses impacts environnementaux.

De façon générale, ces procédés manquent encore de données génériques et même spécifiques, faute de pratique. Ils ne peuvent donc pas être convenablement traités ici.

METAUX (ACIER)

DIFFICULTES DE CAPTAGE DES ACIERS EMIS LOCALEMENT

Les collectes locales d'acier qui proviennent beaucoup du secteur privé souffrent parfois d'une certaine efficacité et d'une certaine régularité, ce qui peut communément impliquer l'importation de matières issues de déchets. Or, une telle importation accroît l'impact environnemental de la chaîne logistique, ainsi que l'incertitude sur la qualité.

³² <https://echa.europa.eu/fr/regulations/reach/understanding-reach>

DEPENDANCE DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE A LA QUALITE

Selon la publication « Influence of Input-Scrap Quality on the Environmental Impact of Secondary Steel Production »³³, l'importante consommation énergétique de la transformation de l'acier dépend directement de la qualité des déchets d'acier transformés, et peut ainsi s'accroître jusqu'à 45%. Or les flux de déchets impactent directement la qualité de la matière transformée par le niveau d'impuretés qu'ils contiennent.

ABSENCE D'HOMOGENEISATION AVEC LA MATIERE VIERGE APRES RECEPTION DES DECHETS METALLIQUES

Le paramètre présenté ci-dessus est d'autant plus important dans le cas où il n'y a pas d'étape d'homogénéisation au-delà du contrôle effectué en réception, comme c'est parfois le cas, y compris dans l'industrie lourde. En effet, cette étape peut permettre de diluer les pics d'impureté dans l'approvisionnement et ainsi éviter un véritable problème de qualité des produits fabriqués, pouvant impliquer des rebuts de fabrication.

EMISSIONS CONSEQUENTES DANS L'EAU ET DANS L'AIR LORS DE LA TRANSFORMATION

Il semble que des émissions conséquentes dans l'eau et dans l'air soient généralement observées lors de la transformation, en particulier de la poussière, du SO₂, des NO_x et du CO pour l'air. Il s'agit donc de les minimiser en suivant les différentes recommandations des MTD (Maximum Tolerated Dose, ou dose maximale tolérée d'un médicament chez un patient avant l'apparition d'effets indésirables inacceptables).

EXISTENCE D'UN SEUIL MINIMAL POUR L'IMPACT SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Il semble exister un seuil de basculement à partir duquel l'impact sur le changement climatique est moindre pour l'incorporation de matière recyclée. La publication « Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash »³⁴ le met en évidence à 21% dans le cas des déchets issus de mâchefers et laisse penser que ce seuil est inférieur à ce niveau dans les autres cas moins complexes.

COMPLEXITE DE TRAITEMENT DES MACHEFERS

Les mâchefers, qui génèrent environ 235 kt par an soit 4% de l'acier recyclé en France, doivent être traités selon une filière spécifique, qui est plus longue et plus impactante que la filière classique, avec au moins l'étape supplémentaire de retrait des agrégats. En conséquence, un bon principe serait de limiter la quantité d'acier recyclé issue des mâchefers.

RISQUE D'EMISSION DE GAZ LORS DU TRAITEMENT DES PRODUITS AEROSOL

Dans la publication « The circular aspects and recycling of materials in the aerosol industry »³⁵, l'auteur met en évidence un risque d'émission supplémentaire de gaz pouvant augmenter l'effet de serre, tant

³³ Haupt, M., Vadenbo, C., Zeltner, C., & Hellweg, S. (2017). Influence of input-scrap quality on the environmental impact of secondary steel production. *Journal of Industrial Ecology*, 21(2), 391-401.

³⁴ Allegrini, E., Vadenbo, C., Boldrin, A., & Astrup, T. F. (2015). Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash. *Journal of Environmental management*, 151, 132-143.

³⁵ Niemiec, K., Fitzyk, A., & Grabowik, C. (2021). The Circular Economy Aspects and Recycling of Materials in the Aerosol Industry. *International Journal of Manufacturing Economics and Management*, 31-39.

pour les aérosols en acier qu'en aluminium. Il peut donc être recommandé de limiter la quantité d'acier recyclé en provenance des déchets d'aérosol qui se retrouvent principalement dans les déchets ménagers.

VERRE

EMISSIONS DE PRODUITS DE COMBUSTION ET DE PARTICULES

Au-delà des importants impacts évités en consommation de matière et d'énergie, les MTD montrent des émissions de produits de combustion, mais aussi de particules lors de la transformation, qu'il s'agit de minimiser au risque d'engendrer des impacts environnementaux supérieurs à ceux généralement considérés. En particulier, l'oxydation à haute température peut générer des polluants atmosphériques comme l'oxyde d'azote et le dioxyde de soufre.

INTERVENTION DU TRAITEMENT DE L'EAU DE LAVAGE

Le traitement des eaux de lavage des emballages en verre constitue une étape importante de la préparation du calcin qui peut être à l'origine d'impacts environnementaux. Il s'avère donc nécessaire de s'assurer qu'elle est bien considérée.

INTERET D'UNE MASSIFICATION LOCALE EN CENTRE DE TRAITEMENT

De façon générale, le poids des emballages en verre les rend peu enclins à circuler sur de longues distances et joue en faveur d'une massification locale au niveau de centres de traitement. Cela semble être le cas en France, avec 14 centres de traitement qui sont situés à proximité des sites verriers.

PERTURBATION LIEE A LA PRESENCE DE VITROCERAMIQUE

Un véritable élément perturbateur de la chaîne de valeur semble être constitué par la présence de vitrocéramique, qui possède une température de fusion plus élevée que le verre, peut être acceptée lors du tri car elle est également opaque aux UV. Sa simple présence peut en effet déboucher sur un arrêt des machines et donc générer des pertes conséquentes en termes de consommation d'énergie.

PRESENCE D'ACCESSOIRES METALLIQUES NON-MAGNETIQUES

Un autre élément perturbateur a été identifié plus récemment en la présence d'accessoires métalliques, comme les bouchons mécaniques situés sur certains emballages en verre. Comme ils ne sont pas magnétiques, ils sont en effet difficiles à éliminer lors du tri et constituent des impuretés pouvant être à l'origine de bulles (fusion à 1 200 °C contre 1 500 °C pour le verre) fragilisant ensuite les emballages en verre et favorisant donc les rebuts de fabrication.

MODE DE TRI ET DE PREPARATION EN CENTRE DE TRAITEMENT A PARTIR DU VERRE BLANC

En centre de traitement, le verre blanc est séparé préférentiellement par tri optique des verres colorés après une préparation destinée à éliminer les étiquettes et atteindre la granulométrie cible. L'obtention d'autres couleurs se fait ensuite par une formulation ainsi que par l'ajout d'additifs colorants à partir du mélange issu de la collecte mixte, ce qui permet d'obtenir toutes les teintes (brune, verte, jaune), mais aux dépens d'un certain incrément des impacts environnementaux.

INTÉRÊT EN REMPLACEMENT DU BÉTON

La publication « Is open-loop recycling the lowest preference in a circular economy? Answering through LCA of glass powder in concrete »³⁶ montre un intérêt évident dans le cas particulier de l'utilisation de calcin en remplacement du béton. Il ne semble donc pas falloir émettre de réserve environnementale à cette forme de recyclage secondaire.

BETON

L'IMPACT DE LA LOGISTIQUE

La littérature présente une forte sensibilité des résultats au scénario de transports : les conclusions peuvent même changer. Le recyclage est moins impactant qu'enfouir ou remblayer qu'à la condition de réduire les distances de transports. L'unité mobile de traitement par criblage à sec représente une opportunité de réduire l'impact des granulats recyclés³⁷.

LES PROCÉDES DE RECYCLAGE

Selon les procédés et le niveau de finesse recherchée, les consommations d'énergie et d'eau représentent le deuxième contributeur à l'impact de la filière. Le procédé de criblage à sec permet de réduire drastiquement les consommations d'eau.

TAUX DE SUBSTITUTION

Notons que pour la production de béton (recyclé ou non), le premier contributeur est le ciment. Si le béton recyclé nécessite davantage de ciment, celui-ci peut alors devenir plus impactant que le béton naturel.

Produire du granulat recyclé est équivalent à la production de granulats naturels, du point de vue environnemental et notamment changement climatique. Le taux de substitution 1:1 cité dans la plupart des études, ne permet pas de prise en compte de la dégradation de qualité des granulats, qui peut entraîner une augmentation de la teneur en ciment du béton (et aussi en eau). Les granulats recyclés affectent les performances du béton en matière de propriétés de transfert, selon une intensité qui dépend de leurs caractéristiques intrinsèques (porosité), du taux de substitution et de la compacité de la matrice cimentaire du nouveau béton.

CARBONATATION DES GRANULATS RECYCLES

75 à 150kg de CO₂ peuvent être stockés dans 1t de granulats de béton recyclé et permet d'éviter l'extraction de 650kg de granulats vierges (*Eiffage et IFSTARR*)³⁸. La fraction fine 0-4mm de granulats de béton recyclé peut absorber jusqu'à 30kg CO₂e/t contre seulement 5kg CO₂e/t pour la fraction 4-16mm.

³⁶ Deschamps, J., Simon, B., Tagnit-Hamou, A., & Amor, B. (2018). Is open-loop recycling the lowest preference in a circular economy? Answering through LCA of glass powder in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 185, 14-22.

³⁷ Mostert, C., Sameer, H., Glanz, D., & Bringezu, S. (2021). Climate and resource footprint assessment and visualization of recycled concrete for circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105767.

³⁸ https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/filieres-dechets-recyclage.pdf

ECONOMIE CIRCULAIRE ET LA PRESERVATION DES RESSOURCES.

L'empreinte carbone de l'eau, du sable et du gravier, est relativement limitée. Cependant, d'autres enjeux écologiques sont liés à ces ressources. Si le recours à des granulats recyclés présente un faible impact sur les émissions carbone, il présente des intérêts au travers d'autres indicateurs environnementaux et notamment la raréfaction des ressources. Pour exemple, 66 à 75% du sable extrait sur terre est utilisé pour le béton, soit 30 milliards de tonnes par an. Cette extraction du sable peut entraîner dans certains cas des dommages de destruction de la biodiversité, de pollution des rivières et d'affaissement des côtes et des berges.

Des bénéfices « collatéraux » à la mise en place d'une filière de recyclage du béton proviennent du recyclage de la ferraille dans le béton, si l'on considère les impacts évités, au-delà des frontières.

3.3 Enjeux environnementaux des filières de recyclage

Il peut être intéressant à ce stade d'identifier les principaux enjeux environnementaux des filières de recyclage et notamment les principaux indicateurs qu'elles impactent par leurs différentes étapes.

3.3.1 Analyse du poids des étapes des filières

Comme le montrent les organigrammes présentés en Annexe 3-A : Organigramme de la filière de recyclage des matières plastiques, les étapes principales des filières de recyclage pour les différents matériaux sont :

- La collecte (éventuellement sélective) depuis le lieu de production des déchets ;
- Le traitement (y compris le tri) de préparation des déchets ;
- La transformation de la matière sur le site d'utilisation de la matière recyclée.

A chaque étape correspond des facteurs qui lui donnent un poids plus ou moins important vis-à-vis de l'environnement.

Au niveau de la collecte, il existe assez peu de facteurs ayant une incidence sur l'environnement, excepté celui de la qualité du tri à la source et le risque d'une émission accrue de pollution plastique. Cette étape a donc un enjeu relativement faible car elle est principalement logistique.

Au niveau du traitement, plusieurs facteurs interviennent, à commencer par celui relatif à l'efficacité du tri qui peut se révéler assez faible, mais aussi celui plus qualitatif de l'élimination des déchets indésirables risquant de contraindre la transformation. Cette étape est donc certainement celle qui a le poids environnemental le plus fort, car elle est le siège de détermination de la qualité.

Au niveau de la transformation, c'est le facteur lié à la consommation énergétique mais aussi à la consommation de matière qui est prépondérant pour l'ensemble des matériaux, en particulier pour l'acier et le verre, mais il n'est question ici que d'un éventuel incrément par rapport à la transformation de la matière vierge. Cette étape a donc un poids environnemental modéré du fait de sa relativité à la situation de la matière vierge.

3.3.2 Efficacité logistique des filières

De façon transversale, il est également important de considérer l'efficacité de la filière dans son ensemble. C'est en fait l'efficacité logistique dont il est question ici et qui influence sans doute autant le bilan environnemental que l'efficacité technique liée au tri de la matière dont il a déjà été question.

Cette efficacité logistique dépend du nombre de sites qui sont effectivement employés pour réaliser les différentes étapes de la collecte et du traitement. En effet, chaque utilisation d'un nouveau site implique non seulement un transport, mais également un stockage parfois long et une prise en charge qui sont à l'origine d'impacts environnementaux.

Ainsi, il peut être intéressant d'évaluer le nombre de sites utilisés en amont de la transformation et d'évaluer ainsi l'efficacité logistique. Toutefois, la chaîne logistique est souvent en partie méconnue faute d'une bonne traçabilité, en particulier dans le cas d'une importation de matières.

3.3.3 Principaux indicateurs concernés

La plupart des indicateurs généralement considérés sont impactés à des degrés différents par la mise en place d'une filière de recyclage. Les principaux indicateurs concernés sont présentés ci-dessous avec une indication du mécanisme intervenant :

- Epuisement des ressources énergétiques et minérales : consommation plus importante d'énergie et de matériau lors de la transformation ;
- Changement climatique : émission de gaz à effet de serre lors des étapes de collecte et de traitement ;
- Eco-toxicité de l'eau : émissions supplémentaires lors de la transformation ;
- Acidification terrestre : émissions supplémentaires lors de la transformation,
- Consommation d'eau : lavage, criblage lors du traitement et de la transformation ;
- Appauvrissement de la couche d'ozone : émissions (cf. aérosols) lors du traitement ;
- Toxicité humaine : émissions supplémentaires lors du traitement et de la transformation ;
- Emission de microplastiques : multiplication d'étapes de tri peu efficaces.

3.4 Critères techniques à considérer

Des analyses précédentes, il découle un certain nombre de critères influençant les impacts environnementaux qui peuvent se rapporter au matériau, à la filière ou au produit.

3.4.1 Critères relatifs au matériau

TEMPERATURE DE FUSION :

La température de fusion du matériau intervient car elle va déterminer la consommation énergétique nécessaire à chaque opération de transformation. Ces opérations peuvent être multiples comme dans le cas des matières plastiques ou unique lors de la transformation comme c'est le cas des métaux et du verre.

DENSITE ET POIDS :

La densité du matériau recyclé influence la consommation énergétique depuis la collecte des déchets jusqu'à la transformation en produit. Elle intervient parfois au travers du poids des produits en lien avec la chaîne logistique.

DEGRADABILITE PHYSICO-CHIMIQUE :

La dégradabilité physico-chimique du matériau (cf. plastique) est centrale dans la mesure où elle va impliquer une perte de propriétés qui va devoir être compensée. Elle limite aussi la proportion de matière recyclée dans un produit et donc l'efficacité générale du recyclage.

3.4.2 Critères relatifs à la filière

PERFORMANCE DU TRI :

La qualité du matériau recyclée est essentielle pour une acceptation par l'industrie de transformation, mais aussi pour limiter les impacts environnementaux. Elle dépend étroitement de la pureté obtenue après la collecte et le tri des déchets.

EFFICIENCE ENERGETIQUE :

L'efficacité énergétique permet une meilleure performance de la filière, en concurrence avec l'utilisation de matière vierge. C'est un critère intervenant dans les opérations mobilisées aux différentes étapes de la filière, au travers des moyens de collecte et des machines de tri mais aussi des moyens de transport inter-sites.

EFFICACITE LOGISTIQUE :

L'efficacité logistique permet également une meilleure performance de la filière en concurrence avec l'utilisation de matière vierge. Elle peut être évaluée par le nombre d'opérations et de sites effectivement impliqués sur l'ensemble de la filière.

PROPORTION IMPORTEE :

L'importation de matière recyclée peut introduire des impacts supplémentaires au travers de l'efficacité logistique, mais également d'un risque de moindre qualité à l'origine de problèmes de transformation. Pour certains matériaux, ce facteur peut cependant être difficile à évaluer.

3.4.3 Critères relatifs au produit

TAUX D'INCORPORATION :

Le taux d'incorporation de matière recyclée dans le produit intervient comme critère dans la mesure où il existe un effet d'échelle à l'implication des moyens de la filière de recyclage. Ainsi, les impacts spécifiques seront d'autant moindres que le taux d'incorporation sera élevé.

SATISFACTION DE LA DEMANDE :

D'un point de vue économique, la satisfaction de la demande de matière recyclée est un critère qui peut intervenir selon la méthode employée. De façon générale, il semble qu'il soit favorable de satisfaire la juste demande et non que l'offre y soit trop inférieure ou supérieure.

REGRESSION DE VALEUR :

La progression de la valeur d'usage du produit incorporant la matière recyclée peut intervenir comme critère : il est notamment question d' « up-cycling » dans le cas d'une progression de la valeur d'usage et de « down-cycling » dans le cas plus courant d'une régression de la valeur d'usage. En effet, ce critère peut impliquer des difficultés de mise en œuvre à l'origine d'impacts supplémentaires avec a priori une faveur à une logique régression modérée.

3.5 Illustration par des cas d'école de recyclage secondaire

Il est possible d'illustrer les mécanismes d'intervention des critères précédents au travers de cas d'école de recyclage secondaire, qui représente la situation la plus commune et la moins favorable pour les différents matériaux considérés.

3.5.1 Plastiques

Le cas d'école choisi pour les matières plastiques est celui d'une fibre PET pour un tapis automobile, produite à partir de bouteilles de boissons en PET. Comme les applications sont différentes, il s'agit d'un cas de recyclage secondaire qui permet un transfert de matière plastique (PET) du secteur de l'emballage vers celui de l'automobile.

Les principales étapes de cette filière complète de recyclage sont :

1. Triage et mise en balles des bouteilles issues des collectes sélectives en centre de tri ;
2. Broyage, lavage, tri et conditionnement du PET sur un site dédié ;
3. Extrusion du PET en granulat recyclé approprié (compoundage) ;
4. Extrusion du PET pour la production de fibres textiles (incorporation) ;
5. Transformation de la fibre textile pour la production d'articles automobiles.

Ainsi, la filière proprement dite jusqu'à l'incorporation se compose de 4 étapes qui peuvent se dérouler sur 3 ou 4 sites distincts (l'extrusion en granulat pouvant avoir lieu sur le même site que celui du traitement), qui impliquent autant de transports.



Illustration 1 : Machine de retrait des étiquettes des bouteilles (Source : NORD PAL PLAST)

A chaque étape, il existe un taux de rebut qui est normalement décroissant en fonction de la pureté mais jamais négligeable. De plus, chaque étape est à l'origine d'une consommation d'énergie et d'émissions polluantes.

L'étape d'extrusion du PET recyclé (compoundage) est particulièrement sensible, dans la mesure où elle doit assurer la qualité (pureté, fluidité et couleur) requise à la transformation en fibre textile, qui est particulièrement fine et donc exigeante. Ainsi, il est commun d'y ajouter de nombreuses charges visant une meilleure fluidité, mais aussi des pigments permettant d'atteindre la couleur voulue.

Il est probable que la fibre textile atteigne la teinte souhaitée du fait de la faible teinte à l'état de bouteille de boisson. Autrement, il serait possible que l'entreprise de production de fibre textile ait recours à une technologie permettant de rectifier la couleur par une co-extrusion en surface de matière vierge de la couleur requise.

3.5.2 Métaux (acier)

Le cas d'école choisi pour les métaux est celui d'un fer (ou rond) à béton produit à partir de boîtes de conserve en acier. De même ici, comme les applications sont différentes, il s'agit d'un cas de recyclage secondaire qui permet un transfert de l'acier du secteur de l'emballage vers celui de la construction.

Les principales étapes de cette filière complète de recyclage sont :

1. Triage et mise en paquets des boîtes issues des collectes sélectives en centre de tri ;
2. Broyage et fusion en four électrique, coulage continu et laminage à chaud en barres sur un site dédié (incorporation) ;
3. Laminage à froid, crantage et découpage.

Ainsi, la filière proprement dite jusqu'à l'incorporation se compose de 2 étapes qui peuvent se dérouler sur 2 sites distincts qui impliquent autant de transports.

Il est possible qu'une partie des déchets ménagers ait été importée et ajoute ainsi du transport à la filière. L'approvisionnement en déchets de qualité issus de conserves n'est par ailleurs pas évident, compte tenu d'un gisement relativement faible, et il est probable que ces déchets ménagers soient en réalité mélangés avec des déchets en provenance d'autres secteurs (y compris du traitement final des déchets avec les mâchefers).



Illustration 2 ; Fers (ou ronds) à béton crantés (Source : ARCELOR-MITTAL)

La consommation énergétique est surtout importante au moment de la fusion du métal. Il en est de même des principaux impacts sur l'environnement local.

Cependant, l'étape de tri est particulièrement importante sur la qualité car il n'existe généralement qu'un contrôle de la qualité à l'entrée des sites de transformation. Or cette qualité peut être à l'origine d'un accroissement important de la consommation énergétique.

3.5.3 Verre creux

Le cas d'école choisi pour le verre est celui de fibres isolantes produites à partir de bouteilles en verre. Ici également, comme les applications sont différentes, il s'agit d'un cas de recyclage secondaire qui permet un transfert du verre du secteur de l'emballage vers celui de la construction.

Les principales étapes de cette filière complète de recyclage sont :

1. Triage (y compris par couleur) et mise en bacs des bouteilles issues des collectes sélectives en centre de tri ;
2. Broyage et production du calcin en centre de traitement ;
3. Mélange avec des adjuvants et fusion en four électrique (incorporation) ;
4. Extrusion et fibrage en assiette ;
5. Pulvérisation d'un liant plastique ;
6. Surfaçage et découpage.

Ainsi, la filière proprement dite jusqu'à l'incorporation se compose de 3 étapes qui se déroulent sur 3 sites distincts, qui impliquent autant de transports.



Illustration 3 : Production de fibres de verre isolantes après extrusion (Source : ISOVER)

La consommation énergétique est surtout importante au moment de la fusion du calcin. Il en est de même des principaux impacts sur l'environnement local.

Toutefois, l'étape du centre de traitement est déterminante pour la qualité du calcin et l'étape suivante de la transformation. C'est en effet à cette étape qu'il faut éliminer tous les éléments et matériaux indésirables comme les accessoires ainsi que la vitrocéramique susceptible d'être à l'origine d'une véritable perturbation et de générer une surconsommation énergétique.

Par ailleurs, l'exigence en termes de couleur de la fibre isolante peut être telle que seules les bouteilles de verre blanc peuvent être acceptées. Quoi qu'il en soit, la matière doit être recolorée par pigments lors du mélange.

3.6 Tentative de guidage à partir de seuils quantitatifs

En fonction des contraintes techniques et économiques qui peuvent correspondre à des critères, il en est proposé ici une traduction quantitative sous forme de seuils d'incorporation minimaux et maximaux par matériau.

3.6.1 Méthodologie employée pour la détermination des seuils

Le principe général de la méthodologie employée est de reprendre les principales contraintes techniques et économiques et d'essayer de les traduire en un seuil d'incorporation soit « plancher » soit « plafond » pour les différents matériaux. L'expérience des consultants ainsi que les pratiques réelles ont également guidé l'attribution de ces limites idéales.

En fonction de la sensibilité des critères correspondant aux matériaux considérés, une certaine variabilité des seuils a ensuite été établie. Elle permet de relativiser ces seuils en fonction du contexte et notamment des matériaux.

Pour avoir une idée plus précise de ces seuils par matériau, il a ensuite été possible d'établir une fourchette avec une variabilité adaptée. Le principe est bien entendu d'être conservateurs, en retenant les valeurs les plus restrictives ainsi qu'une valeur moyenne de la variabilité.

Une confrontation à la réalité en France était enfin forcément intéressante. Elle permet en outre de situer les pratiques réelles par rapport à cette approche, en lien avec la variabilité.

3.6.2 Application aux différents matériaux

L'application de cette méthodologie aux différents matériaux est commentée ci-dessous. Les résultats obtenus sont présentés ensuite dans le Tableau 14 ci-après, avec en rouge les éléments « plafond » et en vert les éléments « plancher ».

PLASTIQUES

Les principales contraintes techniques pesant sur le taux d'incorporation des matières plastiques recyclées sont :

- Une perte de propriétés mécaniques (10% par cycle) ou visuelles, avec risque d'augmentation des quantités unitaires ou de compensation chimique – facteur restrictif (variabilité assez faible du fait de la micro-structure) ;
- La multiplicité des sources de déchets avec risque d'ajout d'une étape et de charges pour homogénéisation – facteur restrictif (variabilité élevée du fait des différences de traitement) ;
- La complexité de certains procédés (bi-injection) avec risque d'incrément de consommation énergétique – facteur extensif (variabilité très élevée du fait de l'utilisation des procédés).

La plupart des contraintes techniques sont restrictives, la plus importante et la plus significative étant la perte de propriétés qui va dans le sens d'une réduction du taux d'incorporation.

Les principales contraintes économiques pesant sur le taux d'incorporation des matières plastiques recyclées sont :

- Une insuffisance de la disponibilité locale de qualité, avec risque d'impact logistique (y compris importation) – facteur restrictif (variabilité assez élevée du fait de la provenance des matières) ;
- Un stockage dans la durée des déchets avec risque sur la qualité – facteur extensif (variabilité assez faible du fait du coût du stockage) ;
- Un amortissement de l'immobilisation matérielle en transformation et en négociation – facteur extensif (variabilité faible du fait de l'uniformité des investissements).

La plupart des contraintes économiques sont extensives, la plus significative étant celle de l'amortissement des moyens impliqués dans le traitement.

METAUX (ACIER)

Les principales contraintes techniques pesant sur le taux d'incorporation des métaux (acier) recyclés sont :

- La qualité des flux approvisionnés, faute de tri avant process, avec risque d'incrément de consommation énergétique – facteur restrictif (variabilité élevée du fait d'une inégalité des contrôles) ;
- Une efficacité supérieure à partir d'une certaine proportion de matière recyclée, avec risque sur changement climatique – facteur extensif (variabilité assez faible du fait de l'uniformité des procédés).

Les contraintes techniques sont plutôt restrictives, la plus significative étant celle de la qualité qui va dans le sens d'une réduction du taux d'incorporation.

Les principales contraintes économiques pesant sur le taux d'incorporation des métaux (acier) recyclés sont :

- L'insuffisance de la disponibilité locale de qualité avec risque d'impact logistique (y compris importation) – facteur restrictif (variabilité assez élevée du fait de la provenance éloignée des matières) ;
- L'amortissement de l'immobilisation matérielle en transformation et en négociation – facteur extensif (variabilité faible du fait de l'uniformité des investissements).

Les contraintes économiques sont équilibrées et à replacer dans un contexte en évolution, la plus significative étant celle de la disponibilité locale qui peut très bien augmenter.

VERRE CREUX

Les principales contraintes techniques pesant sur le taux d'incorporation du verre creux recyclé sont :

- La qualité des flux approvisionnés selon difficultés de tri en amont (vitro-céramique et bouchons) avec risque d'arrêt de process – facteur restrictif (variabilité assez faible du fait d'un contrôle en amont) ;
- Un ajout d'additifs sur verre blanc pour emballages colorés – facteur restrictif (variabilité assez élevée du fait des différences possibles entre sites).

Les contraintes techniques sont uniquement restrictives, la plus significative étant celle de la qualité, qui va dans le sens d'une réduction du taux d'incorporation.

Les principales contraintes économiques pesant sur le taux d'incorporation du verre creux recyclé sont :

- L'insuffisance de la disponibilité locale de qualité avec risque d'impact logistique (y compris importation) – facteur restrictif (variabilité assez faible du fait de la provenance locale des matières) ;
- L'amortissement de l'immobilisation matérielle en transformation et en négociation – facteur extensif (variabilité faible du fait de l'uniformité des investissements).

Les contraintes économiques sont équilibrées et à replacer dans un contexte en évolution, la plus significative étant celle de la disponibilité locale qui peut très bien augmenter.

Tableau 14 : Etablissement des fourchettes de seuils d'incorporation selon les contraintes environnementales (grille complète en ANNEXE 4 : Etablissement des fourchettes de seuils d'incorporation selon les contraintes environnementales)

Synthèse des taux d'incorporation	Facteurs techniques	Facteurs économiques	Préconisation de seuils	
			Fourchette	Réalité FR
Plastiques	Perte de propriétés mécaniques ou visuelles (Max = 30%)	Disponibilité locale de qualité	Cible. 30% Plancher. 20%	0% - 80% [moy. 20%]
	Multiplicité des sources de déchets	Stockage dans la durée des déchets (Min. 20%)		
	Complexité de certains procédés (Min. 20%)	Amortissement de l'immobilisation matérielle (Min. 20%)		
Métaux (acier)	Qualité des flux approvisionnés faute de tri avant process	Disponibilité locale de qualité (Max = 50%)	Cible. 50% Plancher. 20%	0% - 100% [moy. 47%]
	Efficacité supérieure à partir d'une certaine proportion recyclée	Amortissement de l'immobilisation matérielle (Min. 20%)		
Verre creux	Qualité des flux approvisionnés faute de tri avant process	Disponibilité locale de qualité (Max = 60%)	Cible. 60% Plancher. 30%	0% - 100% [moy. 61%]
	Ajout d'additifs sur verre blanc pour emballages colorés	Amortissement de l'immobilisation matérielle (Min. 30%)		
Béton	Potentielle perte de propriété mécanique (Max = 60% (Type 1) et 25 % (Type 2))		Cible 60% (T1) 25% (T2)	0 - 100% [moy. 10%]

Facteur incitatif du taux d'incorporation
Facteur restrictif du taux d'incorporation

BETON

La norme NF EN 206+A2/CN : 2022³⁹ précise, pour chaque type de granulats recyclés (type 1, type 2,) le taux de substitution de granulats naturels maximum autorisé (%), en fonction de la classe d'exposition à laquelle est soumis le béton. Le béton contenant des granulats recyclés est classé en fonction de son taux massique total de granulats recyclés, et du type de gravillons recyclés. Le taux massique total de granulats recyclés = masse de granulats recyclés (sables + gravillons) / masse totale de granulats (sables + gravillons) (arrondi à 0.01 près)

Cette classe de taux de substitution en granulats recyclés est prise en compte par les normes Eurocode EC2 pour les calculs de dimensionnement. Le prescripteur doit prendre en compte l'utilisation d'un béton de classe R2 et au-delà dans le cas de béton armé (R1 et au-delà pour le béton précontraint) au niveau des règles de dimensionnement (cf. normes NF EN 1992-1-1/CN et NF EN 1992-1-2/CN).

Tableau 15 Classes de taux de substitution de granulats recyclés dans les bétons (source : NF EN 206+A2/CN)

Classe de taux de substitution en granulats recyclés	R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Plage de taux massique total de granulats recyclés (sable recyclé + gravillon Type 1)	0,01-0,05	0,06 – 0,15	0,16 -0,25	0,26 -0,40	0,41 -0,55	0,56 -0,70	0,71 -0,85	0,86 -1,00
Plage de taux massique total de granulats recyclés (Sable recyclé + gravillons de type 2)	0,01-0,02	0,03 – 0,07	0,08 -0,12	0,13 -0,20	0,21 -0,27	0,28 -0,35	0,36 -0,42	0,43 -0,50

La norme définit 3 types de gravillons recyclés (Type 1 à 3) à partir de leurs caractéristiques et précise pour chaque type de granulats recyclés le taux de substitution de granulats naturels maximum prévu en fonction de la classe d'exposition à laquelle est soumis le béton. Les 3 types de gravillons recyclés sont définis en fonction de leurs caractéristiques :

- Type 1 : toutes les caractéristiques sont CRb (granulats recyclés de qualité haute) ;
- Type 2 : toutes les caractéristiques sont CRb ou CRc (granulats recyclés de qualité intermédiaire) ;
- Type 3 : toutes les caractéristiques sont CRb ou CRc ou CRd (granulats recyclés de qualité basse).

En fonction des classes d'exposition considérées et du type de gravillon recyclé, des pourcentages massiques maximaux d'introduction de granulats recyclés sont définis. Ces pourcentages correspondent au pourcentage de la masse de gravillon recyclé rapportée à la masse totale de gravillons.

³⁹ NF EN 206+A2/CN : 2022 Béton - Spécification, performances, production et conformité

Tableau 16 Pourcentage massique maximum pour les granulats recyclés de type 1&2 et le sable recyclé (Source : NF EN 206+A2/CN)

	X0	XC1, XC2		XC3, XC4, XF1		XD1, XS1		XF2, XD2, XD3		XS2, XS3		XF3, XF4		XA
Gravillon recyclé type 1	60	40	60	30	50	30	50	20	40	10	30	10 a	30 a	0b
Sable recyclé	30	10	20	10	20	10	20	10	15	10	15	0b	15	0b
Règles de formulation complémentaire		/	E_{ff}/L_{eq} max abaissé de 0,05 ^c	/	E_{ff}/L_{eq} max abaissé de 0,05 ^c	/	E_{ff}/L_{eq} max abaissé de 0,05 ^c	/	E_{ff}/L_{eq} max abaissé de 0,05 ^c	/	E_{ff}/L_{eq} max abaissé de 0,05 ^c	/	E_{ff}/L_{eq} max abaissé de 0,05 ^c	
a Gravillons résistants au gel au sens de la norme NF P18-545.														
b A l'exception des granulats récupérés qui restent utilisables dans les conditions du 5.2.3.3 et NA.5.2.3.3.														
c Par rapport aux préconisations des tableaux NA F														
NOTE Ces taux sont vérifiés en arrondissant le taux de substitution au pourcentage le plus proche.														
	X0	XC1, XC2		XC3, XC4, XF1		XD1, XS1		XF2, XD2, XD3		XS2, XS3		XF3, XF4		XA
Gravillon recyclé type 2	40	20	30	15	25	15	25	10	20	5	15	5 a	15 a	0 b
Sable recyclé	15	5	10	5	10	5	10	5	5	0b	5	0b	5	0b
Règles de formulation complémentaire		/	E_{ff}/L_{eq} max abaissé de 0,05 ^c	/	E_{ff}/L_{eq} max abaissé de 0,05 ^c	/	E_{ff}/L_{eq} max abaissé de 0,05 ^c	/	E_{ff}/L_{eq} max abaissé de 0,05 ^c	/	E_{ff}/L_{eq} max abaissé de 0,05 ^c	/	E_{ff}/L_{eq} max abaissé de 0,05 ^c	
aGravillons résistants au gel au sens de la norme NF P18-545.														
bA l'exception des granulats récupérés qui restent utilisables dans les conditions du 5.2.3.3 et NA.5.2.3.3.														
c Par rapport aux préconisations des tableaux NA F														
NOTE Ces taux sont vérifiés en arrondissant le taux de substitution au pourcentage le plus proche.														

Les classes R5 et au-delà ne peuvent être utilisées que via une approche performancielle selon les dispositions de la norme NF EN 206+A2/CN.

Bien que la filière soit moins développée nous pouvons avancer les critères suivants :

- **Seuil minimum** : 10% correspondant à la part de granulats recyclés sur la production nationale totale de granulats⁴⁰ ;
- **Seuil maximum** : 60% pour le type 1 et 25% pour le type 2 correspondant aux seuils maximums autorisés sans réalisation d'analyses de performances plus poussées.

3.6.3 Intégration de l'approche sectorielle

La cartographie sectorielle par matériau était intéressante à reprendre à ce niveau pour y confronter les fourchettes de seuils ayant été préalablement déterminées. Cet exercice est cependant complexe, dans la mesure où les contraintes peuvent être différentes selon les secteurs, en fonction de l'exigence de l'application.

Ainsi, une approche est proposée au moyen d'un code couleur traduisant la fourchette idéale de taux d'incorporation en fonction de la réalité connue des contraintes par secteur :

- Rouge : 0-20% ;
- Orange : 20-40% ;
- Jaune : 30-40% ;
- Vert : 40-60%.

Lorsque plusieurs procédés étaient possibles, comme dans le cas du PET, un niveau moyen a été choisi. La cartographie obtenue est présentée ci-après. Elle est commentée ensuite par matériau.

⁴⁰ <https://www.pnrecybeton.fr/>

Secteur / Matériau	Plastiques				Verre	Métaux	
	PE / PP	PET	PVC	PS		Acier	Aluminium
Industrie de l'emballage	Sacs ; Barquettes ; Palettes	Bouteilles ; Barquettes	Bassines	Plateaux logistiques	Bouteilles ; Pots ; Verres	Boîtes de conserve	Canettes ; Barquettes ; Film
Industrie de transformation	Embouts pour bobines			Embouts pour bobines			Contenants divers
Industrie automobile	Planches AR		Bâches	Plateaux logistiques	Vitres	Pièces de moteur	Jantes ; Culasses
Industrie textile	Films agricoles ; Embouts pour bobines	Vêtements					
Industrie de l'équipement	Clôture ; Mobilier urbain ; Jouets ; Outils		Moquettes ; Manches ; Rideaux	Cintres ; Pièces d'appareils ; Boîtiers	Ustensiles de cuisine	Outils ; Clous	Mobilier de jardin
Industrie de la construction	Tuyaux ; Planches ; Piquets ; Panneaux		Tuyaux ; Planches		Matériau isolant ; Fondations ; Carreaux	Fers à béton ; Poutrelles	Menuiseries

Tableau 17 : Cartographie sectorielle avec couleur selon le niveau idéal du taux d'incorporation

PLASTIQUES

La multiplicité des matières concernées par le recyclage dans les différents secteurs intervient dans le taux d'incorporation au travers des paramètres suivants :

- Les procédés de traitement qui varient sensiblement d'une matière à l'autre (exemple du PET) ;
- Les différences éventuelles de microstructures qui la rendent plus ou moins sensible au traitement mécanique ;
- Le niveau d'exigence du secteur d'application (exemple de l'alimentarité pour l'emballage).

Ainsi, les niveaux idéaux de taux d'incorporation par secteur sont relativement bas et couvrent de la situation la plus défavorable de l'emballage alimentaire en PE ou PP, à la situation la plus favorable d'une pièce massive de mobilier urbain en PVC.

VERRE CREUX

Pour le verre, il existe peu de paramètres liés à la matière en lien avec sa faible dégradation, mais la contrainte de la couleur est prise en compte. Ce sont donc principalement les paramètres liés aux contraintes des procédés de transformation qui sont déterminants, à commencer par le contrôle à réception.

Ainsi, les niveaux idéaux de taux d'incorporation par secteur sont relativement hauts. La situation la plus défavorable est celle de l'isolant en lien avec la finesse de l'application et la situation la plus favorable est celle des récipients translucides.

METAUX (ACIER)

Pour l'acier, il existe peu de paramètres liés à la matière, en lien avec sa faible dégradation, mais la contrainte de l'homogénéité est prise en compte. Ce sont donc principalement les paramètres liés aux contraintes des procédés de transformation qui sont déterminants, notamment à un niveau énergétique. Ainsi, les niveaux idéaux de taux d'incorporation par secteur sont relativement hauts. La situation la plus défavorable est celle de clous en lien avec la finesse de l'application et la situation la plus favorable est celle de pièces automobiles assez massives.

4. Recommandations de critères permettant de guider l'achat de produits contenant du recyclé

4.1 Présentation de la grille de critères

La grille proposée dans cette partie (*Tableau 18*) permet d'identifier les critères permettant de maximiser le gain environnemental permis par l'incorporation de matière recyclée dans un produit. Elle s'adresse soit à un fabricant souhaitant intégrer de la matière recyclée dans la conception de son produit, soit à un acheteur de produits contenant de la matière recyclée.

La première colonne correspond aux paramètres influençant les performances environnementales émanant de l'approche méthodologique (chapitre 2). Ces paramètres sont classés selon leur influence sur les performances environnementales d'un point de vue quantitatif. Ainsi les paramètres les plus influents sont listés en premier. Pour chaque paramètre un ou plusieurs critères techniques et économiques ont été identifiés par l'analyse sectorielle (chapitre 3) pour les différents matériaux considérés (plastiques, métaux, verre et béton). Certains critères concernent tous les matériaux, d'autres sont plus spécifiques. Deux groupes de critères sont distingués selon le niveau d'accessibilité supposée des données nécessaires à les qualifier :

- Une disponibilité supposée immédiate pour le fabricant des produits (utilisateur de matière recyclée) et l'acheteur de produit contenant du recyclé [en gras] ;
- Une moindre disponibilité pour le fabricant des produits et surtout pour l'acheteur de produits contenant du recyclé, nécessitant un plus haut niveau de traçabilité [en régulier].

Tableau 18 : Présentation de la structure de la grille

Paramètres clefs influençant les performances environnementales	Critères technique et économique à considérer	Sections du rapport référence	Matériaux concernés
1.Pourcentage de matière recyclée incorporée	1.1 Taux d'incorporation min et cible/max par matériau	3.6 Tentative de guidage à partir de seuils quantitatifs	TOUS
2.Impact du procédé de recyclage : process et logistique	2.1 Procédé de recyclage	3.2.2 Etapes principales et point de substitution	PLASTIQUE & BETON
	2.2 Propriétés thermiques	3.4.1 Critères relatifs au matériau	PLASTIQUE & ACIER
	2.3 Qualité des déchets (type et origine)	3.1.1 Types de gisements	PLASTIQUE, VERRE & ACIER
	2.5 Origine géographique de la matière secondaire		TOUS
	2.6 Chaîne logistique (nombre de sites impliqués)	3.2.3 Aspects logistiques	TOUS
	2.7 Ajout de charges (modification)	3.1.1 Types de gisements	PLASTIQUE
	2.8 Valorisation des co-produits	3.2.1 Accessibilité de la matière recyclée	TOUS
3.Taux de substitution de la matière première et qualité de la matière secondaire	3.1 Origine géographique de la matière secondaire	2.3.1 Les labels environnementaux et normes relatives au recyclage	TOUS
	3.2 Etapes préalables à la transformation (homogénéisation)	3.2.4 Facteurs techniques à incidence environnementale	PLASTIQUE & ACIER
	3.3 Durée de stockage de la matière	3.6 Tentative de guidage à partir de seuils quantitatifs	PLASTIQUE
	3.4 Qualité de la matière recyclée	2.2. Analyse comparative de 4 méthodologies de modélisation des matériaux recyclés	TOUS
4.Ratio offre/demande	4.1 Facteur déterminant (offre ou demande)	3.1.2 Tentative de quantification des flux	TOUS
	4.2 Ratio de prix recyclé/vierge	3.1.5 Demande de matières secondaires	TOUS
	4.3 Durée de stockage de la matière	3.1.5 Demande de matières secondaires	PLASTIQUE
5.Impacts évités	5.1 Ratio de l'impact vierge/recyclé	2.2. Analyse comparative de 4 méthodologies de modélisation des matériaux recyclés	TOUS
	5.2 Valorisation en réemploi	2.3.1 Les labels environnementaux	TOUS
	5.3 Valorisation énergétique par incinération	2.2 Analyse comparative de 4 méthodologies de modélisation de matériaux recyclés 3.2.4 Facteurs techniques à incidence environnementale	PLASTIQUE
6.Influence de la conception du produit suivant (hors scope)	6.1 Nouveau procédé (investissement)	3.2.2 Etapes principales et point de substitution	PLASTIQUE
	6.2 Ajout de charges	3.1.1 Types de gisements	PLASTIQUE & BETON
	6.3 Utilisation de substances dangereuses	3.2.4 Facteurs techniques à incidence environnementale	PLASTIQUE

Pour chaque critère, certaines conditions sont à réunir pour décrire une situation favorable (maximisation du gain) ou défavorable où l'impact de la matière recyclée risque d'être égal voire plus élevé que la matière vierge remplacée. Les éléments pour qualifier la situation sont décrites par matériaux dans la section 4.2 Qualification des situations favorables et défavorables par matériau. Avant cela, nous présentons chaque critère ci-dessous.

(1) Pourcentage de matière recyclée incorporée :

Le taux d'incorporation min et cible/max par matériau peut à lui seul donner une indication générale sur le niveau attendu d'impact environnemental. La fourchette favorable est définie par un seuil minimum correspondant à un taux d'incorporation de base et maximum au-delà duquel les contraintes techniques ou économique sont plus élevées. La définition des seuils est décrite dans les différentes sections de la partie 4.

(2) Procédés et logistiques

- **(2.1) Procédé de recyclage (étapes et impact) :** L'impact du procédé de recyclage est dépendant du nombre d'étapes et de processus réalisés. En effet, les étapes successives impliquent des consommations énergétiques plus importantes et des scénarios de logistiques plus complexes. Or, un nombre d'étapes élevé permet une plus grande maîtrise de la pureté et des dimensions de la matière en sortie sera, en particulier pour une matière plastique à recycler de qualité hétérogène. L'optimisation du processus de recyclage en lien avec les attentes du cahier des charges peut permettre de réaliser des diminutions de l'impact. Les procédés de recyclage par matériau sont décrits en section 3.2.2 Etapes principales et point de substitution.
- **(2.2) Propriétés thermiques (température de fusion) :** Pour être recyclés, les déchets peuvent subir une étape de fusion. Selon les propriétés thermiques des matériaux, la fusion opère à des températures différentes. Les consommations énergétiques sont souvent liées à cette température de fusion. Le critère de température de fusion est plus amplement abordé en section 3.4.1 Critères relatifs au matériau.
- **(2.3) Qualité des déchets (type et origine) :** Les déchets sont de différentes natures selon leur origine. Les déchets d'origine industrielle sont directement collectés en sortie d'usine et souvent triés à la source. Les déchets provenant des ménages sont collectés par les organisations de traitement des déchets souvent à l'échelle d'un territoire. La qualité des déchets dépend fortement de sa source selon le type de matériaux considérés. Plus le déchet est de qualité homogène, moins il nécessite d'étapes de traitement. Les gisements de déchets sont plus amplement abordés en section 3.1.1 Types de gisements et 3.2.1 Accessibilité de la matière recyclée.
- **(2.4) Origine géographique de la matière secondaire (pays, région) :** L'origine géographique de la matière secondaire détermine l'impact du processus de recyclage. Les mix énergétique et électrique sont propres à chaque région ou pays et ont des impacts différents sur l'environnement. Par exemple, le recyclage d'un plastique en Allemagne utilisant une électricité produite à partir de centrale à charbon ne va pas avoir le même impact qu'un recyclage effectué en France avec un mix électrique principalement nucléaire.
- **(2.5) Chaîne logistique (nombre de sites) :** Selon la densité de la matière considérée, les transports entre les différents sites de transformation jouent un rôle important. La multiplication des acteurs et des sites dans la chaîne de recyclage allonge la chaîne logistique ce qui augmente sa contribution à l'impact. Le nombre de sites et les distances qui les séparent sont donc des paramètres influents. Les chaînes logistiques sont décrites en section 3.2.3 Aspects logistiques.
- **(2.6) Ajout de charges (modification et réduction) :** L'ajout de charge au cours du processus de recyclage conditionne la recyclabilité de la matière et du produit l'employant une fois arrivée en fin de vie. En effet, certains ajouts perturbent le processus de recyclage (section 3.1.1 Types de gisements).

- **(2.7) Valorisation des co-produits** : Qu'advient-il des co-produits au moment de la récupération des matériaux pour recyclage ? Sont-ils valorisés ? Ont-ils une fin de vie ultime ? Si l'ensemble des matériaux contenus dans le gisement de déchets est traité, la part du processus alloué à chaque matériau est moindre.

(3) Taux de substitution et qualité de la matière

- **(3.1) Origine géographique (qualité du traitement)** : Les qualités de la matière et du processus de recyclage varient selon la région ou le pays d'origine. Des labels et normes existent pour attester des conditions de recyclage et de la qualité des produits intégrant du recyclé pour certaines matières comme le plastique (section 2.3.1 Les labels environnementaux et normes relatives au recyclage) ou le béton (section 3.6.1 Méthodologie employée pour la détermination des seuils).
- **(3.2) Etape préalable à la transformation (homogénéisation)** : Les déchets collectés ont besoin d'une homogénéisation avant d'intégrer le processus de recyclage. Pour le plastique issu de déchets ménagers, l'homogénéisation du gisement peut augmenter la qualité de la matière (section 3.2.4 Facteurs techniques à incidence environnementale).
- **(3.3) Durée de stockage de la matière (qualité)** : La durée de stockage des déchets peut avoir un impact sur la qualité de la matière secondaire. Une exposition à l'humidité, au soleil ou à des substances particulières peut dégrader la matière stockée (section 3.2.4 Facteurs techniques à incidence environnementale).
- **(3.4) Qualité de la matière recyclée (difficulté de transformation, rendement massique et limitation du taux d'incorporation)** : La matière secondaire recyclée a-t-elle une qualité équivalente à la matière primaire ? Faut-il une masse de matière secondaire plus élevée que si on avait pris une matière primaire ? La question du ratio d'équivalence est abordée dans la section 2.4 Identification des paramètres clés influençant les performances environnementales.

(4) Rapport entre offre et demande

- **(4.1) Facteur déterminant (offre ou demande)** : La disponibilité des matières secondaires est directement liée à la prépondérance de l'offre ou de la demande. Si l'offre est prépondérante alors la matière secondaire est disponible. À l'inverse si la demande prend le pas sur l'offre, la matière secondaire est plus rare (section 3.1.1 Types de gisements). La prise en compte de ce ratio dans les approches ACV est résumée en section 2.4 Identification des paramètres clés influençant les performances environnementales.
- **(4.2) Ratio de prix recyclé/vierge (demande d'autant plus importante)** : La comparaison du prix de la matière vierge et de la matière recyclée permet de se rendre compte de l'intérêt économique ou non d'utiliser la matière recyclée. La valeur économique de la matière vierge peut varier dans le temps. L'intérêt macro-économique de l'utilisation d'une matière recyclée est que son prix de revient dépend peu de facteurs extérieurs et reste donc plus stable que celui de la matière vierge. Ainsi, dans les conjonctures difficiles, le recours aux matières recyclées sera souvent plus favorable (section 3.1.5 Demande de matières secondaires).

- **(4.3) Durée de stockage de la matière** : La durée de stockage des déchets est également révélatrice de la disponibilité de la matière. Plus les stocks de déchets sont importants plus leur valeur est faible et plus ils sont disponibles sauf contraintes techniques particulières liées à la filière de traitement.

(5) Impacts évités (sections 2.2)

- **(5.1) Ratio de l'impact de la matière vierge et de la matière recyclée** : Il est également important de connaître l'impact environnemental de la production de matière vierge et de le comparer à celui du processus de recyclage. Un tel ratio permet d'évaluer la pertinence d'utilisation de la matière secondaire d'un point de vue comptable. L'Annexe 5 : Impacts évités du recyclage : ratio impact matière vierge / matière recyclée contient des ratios génériques calculés pour plusieurs matières à utiliser en première approche. Pour aller plus loin ou dans des cas spécifiques, une étude ACV est nécessaire pour évaluer ce ratio.
- **(5.2) Valorisation en réemploi** : Le réemploi des matières en fin de vie exige très peu voire aucun traitement supplémentaire avant d'être réemployé dans un nouveau produit. Le réemploi minimise l'impact de la matière puisqu'il permet selon la méthodologie choisie d'avoir une matière secondaire sans impact ou de répartir l'impact de la matière vierge sur le nombre de produit utilisant la matière réemployée. Le réemploi est particulièrement présent dans le secteur du bâtiment et de la construction avec des éléments en verre, plastique, métal ou béton qui ont été immobilisés pendant longtemps mais dont la qualité n'a pas été dégradée. Le réemploi s'applique également pour les produits d'emballage en verre, plastique ou métal. Le réemploi est complexe lorsque le démantèlement et la séparation des différents matériaux nécessite une destruction.
- **(5.3) Valorisation énergétique par incinération** : Les déchets plastiques sont valorisables énergétiquement par incinération. Plus ce traitement en fin de vie permet de produire de l'énergie, plus des impacts sont évités. Un matériau à fort potentiel de valorisation énergétique n'a pas d'intérêt en termes d'impact à être mis à disposition du recyclage. Un tel choix fait chuter la qualité des déchets qui disparaissent au profit d'énergie. Pour les autres matériaux, le potentiel de valorisation énergétique est très faible, il n'y a pas d'intérêt à les incinérer.

(6) Influence sur la conception du produit suivant

- **(6.1) Nouveau procédé (investissement)** : L'utilisation de matières recyclées peut impliquer une complexification du design du produit. C'est le cas d'un emballage qui ne pourrait pas mettre en contact l'aliment avec de la matière recyclée. Dans ce cas, le recours à un procédé supplémentaire peut être à l'origine d'une consommation supérieure d'énergie et d'un risque supplémentaire de rebut. Le processus peut être adapté de façon mineure (paramétrage des chaînes de production) ou majeure (nouvelle machine ou nouveau procédé). L'investissement fait n'est pas le même selon la situation.
- **(6.3) Ajout de charges** : L'ajout de charges intervient souvent dans les matières plastiques recyclées pour homogénéiser leurs propriétés physiques. Il peut également intervenir pour les autres matériaux. Cette intervention n'est pas anodine en termes d'impacts environnementaux car elle incorpore une matière souvent vierge réduisant ainsi l'intérêt du recyclage au travers d'un taux d'incorporation inférieur mais elle augmente ainsi souvent sa température de fusion rendant ainsi plus impactantes les étapes de transformation. Par

ailleurs, elle rend la matière moins commune et peut ainsi compromettre sa recyclabilité ultérieure.

- **(6.4) Utilisation de substances dangereuses (fin de vie) :** L'ajout de substances dangereuses comme les adjuvants organo-métalliques persistants dans les plastiques ont une incidence sur l'application de ce plastique et augmente les impacts environnementaux en particulier sur des indicateurs comme la toxicité humaine ou encore l'éco-toxicité de l'eau douce. Par ailleurs, ces substances rendent la matière moins commune ce qui peut compromettre sa recyclabilité ultérieure.

4.2 Qualification des situations favorables et défavorables par matériau

Les tableaux 17 à 20 présentent pour chaque matière les éléments permettant de qualifier les situations favorables et défavorables pour chaque critère.

Tableau 19 : Grille appliquée au plastique

Principaux paramètres influents	Critères techniques et économiques	Situation favorable	Situation défavorable
1. Pourcentage de matière recyclée incorporée	1.1 Taux d'incorporation minimum et cible maximum par matériau	20-30%	>30% (Perte de propriétés mécaniques (10% par cycle) ou visuelles)
2. Impact du procédé de recyclage : process et logistique	2.1 Procédé	Broyage, granulation	Compoundage, micronisation
	2.2 Propriétés thermiques	PE : 140 °C < PP : 160°C	Moyennement défavorable : CPVC : 200°C < PET : 260 °C Ces températures restent faibles en comparaison avec d'autres matériaux (verre, acier, ...)
	2.3 Qualité des déchets (type et origine)	Déchets industriels hors déchets dangereux	Déchets ménagers (risque de perte de qualité)
	2.4 Origine géographique de la matière secondaire	France ou pays limitrophe ayant un mix électrique relativement décarboné (<150 gCO ₂ /kWh) : Espagne, Portugal, Danemark, ...	Pays non limitrophe ou européen ayant un mix électrique non décarboné (>150 g CO ₂ /kWh) : Allemagne, Pologne, Chine, Etats-Unis, ...
	2.5 Chaîne logistique (nombre de sites impliqués)	Pas d'intermédiaire entre l'utilisateur et le générateur de plastique recyclé c'est-à-dire qu'il n'y a qu'un site de production (+un site de collecte et tri dans le cas des déchets ménagers)	3 sites ou plus (un site pour chaque étape)
	2.6 Ajout de charges (modification et réduction)	Pas d'ajout de charge	Ajout de charges lors du processus de recyclage (fibres, charges minérales, stabilisants, colorants, agents de démoulage, ...)

	2.7 Valorisation des co-produits	Valorisation totale des co-produits Le processus de récupération de la matière secondaire permet la valorisation de l'ensemble des autres éléments produits	Valorisation partielle La manière de récupérer et d'isoler la matière recyclée ne permet qu'une valorisation partielle des autres éléments produits
3.Taux de substitution de la matière première et qualité de la matière secondaire	3.1 Origine géographique de la matière secondaire	Union Européenne	Monde
	3.2 Etapes préalables à la transformation (homogénéisation)	Non, il n'y a pas d'étapes préalables avant la transformation	Oui, il y a une ou plusieurs étapes préalables avant la transformation, ce qui engendre des impacts supplémentaires.
	3.4 Qualité de la matière recyclée	Qualité équivalente	Qualité non équivalente (Besoin de plus de matières, d'adaptation, ...)
4.Ratio offre/demande	4.1 Facteur déterminant (offre ou demande ?)	Offre : si l'offre est plus importante que la demande alors il y aura de la matière secondaire disponible	Demande : si la demande est plus importante que l'offre alors la matière secondaire est plus rare voire indisponible
	4.2 Ratio de prix recyclé/vierge	Ratio prix matière secondaire / matière primaire < 0,5 Les prix sont principalement liés à la consommation énergétique de la production et à la disponibilité de la matière secondaire	Ratio prix matière secondaire / matière primaire > 0,5 Une demande très supérieure à l'offre peut entraîner des problèmes de disponibilité qui font monter les prix de la matière secondaire.
5.Impacts évités	5.1 Impact de la matière vierge	Impact matière première élevée comparée à l'impact de la matière secondaire Pour les plastiques et pour une même origine géographique : R est situé entre 2 et 4, ce qui est très favorable au recyclage. Le cas le plus favorable est pour le PET cristallin (Voir Annexe 5)	Utilisation de procédés de recyclage nouveaux ou à l'échelle non industrielle (ex : recyclage chimique). Dans ces cas plus spécifiques, réaliser une ACV complète pour évaluer R.
	5.2 Valorisation en réemploi	Pas de réemploi de la matière plastique	Réemploi
	5.3 Valorisation énergétique du gisement de déchets	La matière plastique utilisée ne peut pas être facilement incinérée	La matière plastique utilisée peut être facilement incinérée La matière plastique est un bon combustible, il y a un intérêt à ne pas recycler cette matière en fin de vie au profit de la valorisation énergétique
6. Influence de la conception du produit suivant (hors scope)	6.1 Nouveau procédé	L'intégration de matière recyclée ne nécessite pas la mise en place de nouveaux procédés de fabrication	L'intégration de matière recyclée nécessite la mise en place de nouveaux procédés de fabrication (ex : ajout d'un film en matière vierge pour le contact alimentaire)
	6.2 Ajout de charges	Pas d'ajout de charge pour garantir l'utilisation de la matière secondaire	Ajout de charges augmentant l'impact de la matière secondaire et sa recyclabilité en fin de vie
	6.3 Utilisation de substances dangereuses	Pas d'ajout de substances dangereuses	Ajout de substances dangereuses persistantes dans la matière secondaire (écotoxicité, toxicité)

Tableau 18 : Grille appliquée aux métaux

Principaux paramètres influents	Critères techniques et économiques	Situation favorable	Situation défavorable
1. Pourcentage de matière recyclée incorporée	1.1 Taux d'incorporation minimum et cible maximum par matériau	20-50%	>50% (risque d'indisponibilité de la matière avec une qualité suffisante à l'échelle locale)
2. Impact du procédé de recyclage : process et logistique	2.2 Propriétés thermiques		Aciers = 1400 - 1500°C Situation défavorable mais globalement similaire pour les différents aciers (Si appliqué à d'autres métaux, la température de fusion peut varier)
	2.3 Qualité des déchets (type et origine)	Déchets industriels hors déchets dangereux	Déchets ménagers (risque de perte de qualité)
	2.4 Origine géographique de la matière secondaire	Régionale (moins de 100km)	Nationale ou internationale (risque d'impact logistique lié à la densité de la matière)
	2.5 Chaîne logistique (nombre de sites impliqués)	Pas d'intermédiaire entre l'utilisateur et le générateur de métal recyclé c'est-à-dire qu'il n'y a qu'un site de production (+ un site de collecte et tri dans le cas des déchets ménagers)	3 sites ou plus (un site pour chaque étape) Tri/collecte Surtri/broyage Fusion/moulage/extrusion
	2.7 Valorisation des co-produits	Valorisation totale des co-produits Le processus de récupération de la matière secondaire permet la valorisation de l'ensemble des autres éléments	Valorisation partielle La manière de récupérer et d'isoler la matière recyclée ne permet qu'une valorisation partielle des autres éléments
3. Taux de substitution de la matière première et qualité de la matière secondaire	3.1 Origine géographique de la matière secondaire	Union Européenne	Monde
	3.2 Etapes préalables à la transformation (homogénéisation)	Non, il n'y a pas d'étapes préalables avant la transformation	Oui, il y a une ou plusieurs étapes préalables avant la transformation donc des impacts supplémentaires.
	3.4 Qualité de la matière recyclée	Qualité équivalente	Qualité non équivalente (Besoin de plus de matières, besoin d'adaptation, ...)
4. Ratio offre/demande	4.1 Facteur déterminant (offre ou demande ?)	Offre : si l'offre est plus importante que la demande alors il y aura de la matière secondaire disponible	Demande : si la demande est plus importante que l'offre alors la matière secondaire est plus rare voire indisponible
	4.2 Ratio de prix recyclé/vierge	Ratio prix matière secondaire / matière primaire = 0,3 En considérant 250€ pour le prix d'une tonne d'acier secondaire. Les prix sont principalement liés à la consommation énergétique de la production.	Une demande très supérieure à l'offre peut entraîner des problèmes de disponibilité qui font monter les prix de la matière secondaire.
5. Impacts évités	5.1 Impact de la matière vierge	Impact matière première élevée comparée à l'impact de la matière secondaire Pour l'acier : R = 3,8 ce qui est très favorable au recyclage (voir Annexe 5)	
	5.2 Valorisation en réemploi	Pas de réemploi de la matière métallique	Réemploi (pas de valorisation énergétique)

Tableau 19 : Grille appliquée au verre

Principaux paramètres influents	Critères techniques et économiques	Situation favorable	Situation défavorable
1. Pourcentage de matière recyclée incorporée	1.1 Taux d'incorporation minimum et cible maximum par matériau	30-60%	>60% (risque d'indisponibilité de la matière avec une qualité suffisante à l'échelle locale)
2. Impact du procédé de recyclage : process et logistique	2.3 Qualité des déchets (type et origine)	Déchets industriels	Déchets ménagers (risque de perte de qualité)
	2.4 Origine géographique de la matière secondaire	Régionale (moins de 100km)	Nationale ou internationale (risque d'impact logistique lié à la densité de la matière)
	2.5 Chaîne logistique (nombre de sites impliqués)	3 sites avec optimisation des distances entre les sites pour minimiser l'impact des transports	3 sites distincts
	2.7 Valorisation des co-produits	Valorisation totale des co-produits Le processus de récupération de la matière secondaire permet la valorisation de l'ensemble des autres éléments	Valorisation partielle des rebuts de tri
3. Taux de substitution de la matière première et qualité de la matière secondaire	3.1 Origine géographique de la matière secondaire	Union Européenne	Monde
	3.4 Qualité de la matière recyclée	Qualité équivalente	Qualité non équivalente (Besoin de plus de matières, besoin d'adaptation, ...)
4. Ratio offre/demande	4.1 Facteur déterminant (offre ou demande ?)	Offre : si l'offre est plus importante que la demande alors il y aura de la matière secondaire disponible	Demande : si la demande est plus importante que l'offre alors la matière secondaire est plus rare voire indisponible
	4.2 Ratio de prix recyclé/vierge	Ratio prix matière secondaire / matière primaire = 0,4 En considérant 50€ pour le prix d'une tonne de calcin. Les prix sont principalement liés à la consommation énergétique de la production.	Une demande très supérieure à l'offre peut entraîner des problèmes de disponibilité qui font monter les prix de la matière secondaire.
5. Impacts évités	5.1 Impact de la matière vierge	Impact matière première élevée comparée à l'impact de la matière secondaire Pour le verre : R = 1,7 ce qui est favorable au recyclage (voir annexe 5)	
	5.2 Valorisation en réemploi	Pas de réemploi	Réemploi (pas de valorisation énergétique)

Tableau 20 : Grille appliquée au béton

Principaux paramètres influents	Critères techniques et économiques	Situation favorable	Situation défavorable
1. Pourcentage de matière recyclée incorporée	1.1 Taux d'incorporation min et cible/max par matériau	10-60% pour le type 1 et 10-25% pour le type 2	>60% (T1) et >25% (T2) nécessite des analyses de performances plus poussées
2. Impact du procédé de recyclage : process et logistique	2.1 Procédé de recyclage	Le criblage à sec permet de réduire l'impact sur l'eau La carbonatation des granulats recyclés permet de séquestrer du carbone	Les étapes de broyage et concassage sont particulièrement consommatrices d'énergie
	2.4 Origine géographique de la matière secondaire	Régionale (moins de 100km)	Nationale ou internationale (risque d'impact logistique lié à la densité de la matière)
	2.5 Chaîne logistique (nombre de sites impliqués)	Tri et recyclage sur place avec unité mobile	Collecte sans tri et absence de plateforme de recyclage régionale
	2.7 Valorisation des co-produits	Recyclage des métaux et du verre plat	Pas de recyclage des rebuts de tri
3. Taux de substitution de la matière première et qualité de la matière secondaire	3.1 Origine géographique de la matière secondaire	France (NF EN 206+A2/CN), UE (EN 206:2013+A2:2021)	Monde
4. Ratio offre/demande	4.1 Facteur déterminant (offre ou demande)	Recyclage sur place ou offre locale	
	4.2 Ratio de prix recyclé/vierge	Recyclage sur place	
5. Impacts évités	5.1 Ratio de l'impact vierge/recyclé	Recyclage sur place	L'impact de la matière première étant faible, le ratio est souvent défavorable au recyclé
6. Influence de la conception du produit suivant (hors scope)	6.2 Ajout de charges		Ajout de ciment pour compenser une plus grande porosité du granulat recyclé

4.3 Application à deux cas d'étude

L'utilisation de la grille de synthèse des critères est illustrée à travers les deux cas d'études suivants pour le plastique et l'acier. Ces cas d'études sont fictifs, tout comme les valeurs prises en exemple dans le déroulé.

4.3.1 Cas d'étude : plastique

Le cas d'étude applicatif détaillé dans cette partie correspond au cas détaillé en 3.5.1 Plastiques associés à l'intégration de PET recyclé issu de bouteilles de boisson dans des tapis textiles pour l'automobile. Afin d'évaluer le potentiel d'impact de la situation et d'identifier les axes à creuser ou améliorer, la grille synthèse de critères appliquée aux plastiques est déclinée. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Principaux paramètres influents	Critères techniques et économiques	Situation
1. Pourcentage de matière recyclée incorporée	1.1 Taux d'incorporation minimum et cible maximum par matériau	Le taux d'incorporation n'est pas détaillé dans le cas d'étude mais nous pouvons supposer qu'il est de 100%. Cela correspond donc à une situation défavorable puisque supérieur à la borne haute. En revanche, les tapis d'automobiles ne présentent pas d'enjeu de résistance mécanique/chimique et un taux d'incorporation élevé n'est donc pas contraignant. Le risque lié à un taux de 100% repose sur la disponibilité de la matière. → Vigilance
2. Impact du procédé de recyclage : process et logistique	2.1 Procédé	Compoundage → Défavorable
	2.2 Propriétés thermiques	PET : 260°C → Vigilance
	2.3 Qualité des déchets (type et origine)	Déchets ménagers (risque de perte de qualité) → Vigilance mais la perte de qualité n'est pas un enjeu majeur du produit
	2.4 Origine géographique de la matière secondaire	France
	2.5 Chaîne logistique (nombre de sites impliqués)	3 ou 4 sites → Défavorable
	2.6 Ajout de charges (modification et réduction)	Ajout de charge → Défavorable
	2.7 Valorisation des co-produits	Les co-produits issus du même gisement de déchets sont recyclés (bouchons de bouteille)
3. Taux de substitution de la matière première et qualité de la matière secondaire	3.1 Origine géographique de la matière secondaire	Union Européenne
	3.2 Etapes préalables à la transformation (homogénéisation)	Non, il n'y a pas d'étapes préalables avant la transformation
	3.4 Qualité de la matière recyclée	Qualité non équivalente mais la matière ne nécessite pas d'ajout de matière supplémentaire car la qualité n'est pas un enjeu sur ce produit
4. Ratio offre/demande	4.1 Facteur déterminant (offre ou demande ?)	Demande élevée → Défavorable
	4.2 Ratio de prix recyclé/vierge	Ratio prix matière secondaire / matière primaire < 0,5 Prix matière secondaire = 800 à 1200 €/t Prix matière primaire = 2200 à 2500 €/t
5. Impacts évités	5.1 Impact de la matière vierge	Impact matière première élevée comparée à l'impact de la matière secondaire. Le cas le plus favorable est pour le PET cristallin R=4
	5.2 Valorisation en réemploi	Pas de réemploi organisé en France (consigne)
	5.3 Valorisation énergétique du gisement de déchets	La matière plastique utilisée peut être facilement incinérée. → Défavorable
6. Influence de la conception du produit suivant (hors scope)	6.1 Nouveau procédé	L'intégration de matière recyclée peut nécessiter la mise en place de nouveaux procédés de fabrication (ex : coextrusion en surface du filament pour la couleur) → Vigilance
	6.2 Ajout de charges	Ajout de charges augmentant l'impact de la matière secondaire et altérant sa recyclabilité en fin de vie → Défavorable
	6.3 Utilisation de substances dangereuses	Pas d'ajout de substances dangereuses

En conclusion, l'intégration de PET recyclé présente un profil avec des critères de vigilance et des critères de risque d'impact environnemental accru. La question de la qualité a été considérée peu centrale pour l'application fictive considérée mais il s'agit d'un point de vigilance particulièrement important pour ce type de matériau recyclé. La grille révèle des enjeux liés à la complexité de la chaîne logistique (plus de 3 sites), de procédés de recyclage plus impactants (compoundage) et d'ajout de charges comme étant des situations défavorables dans le cas présenté. Au global, l'intégration de matière recyclée apparaît relativement favorable dans notre cas mais pourrait être améliorée si la chaîne logistique était simplifiée et l'ajout de charge limité.

4.3.2 Cas d'étude : acier

Il est question ici de se placer en tant que producteur de structure métallique de type jacket, destiné à être utilisé en mer pour des plateformes pétrolières. Il s'agit d'une structure tubulaire en acier fixée dans le fond marin qui soutient la partie supérieure et visible de la plateforme. Elle peut contenir plusieurs dizaines de milliers de tonnes d'acier. Cette structure est protégée de la corrosion et autres attaques liés à l'environnement marin par un traitement de surface incluant plusieurs couches, dont une couche de peinture. L'acier utilisé a une haute valeur ajoutée. Après plusieurs années, il peut néanmoins avoir subi certaines dégradations et ou contenir des substances dangereuses comme l'amiante. L'entreprise se demande alors quel serait le potentiel de réduction de l'impact si ces jackets étaient produits à partir d'acier recyclé à 80%, provenant du démantèlement d'anciennes plateformes.

Dans le cas présent, un champ d'exploitation situé en mer du Nord s'apprête à être démantelé. L'usine de production (fonte des aciers + transformation de l'acier en tubes + soudure et assemblage de la structure) se situe à proximité du DP London Gateway port. La production d'une plateforme dans la même zone (mer du Nord) a été demandée.

Afin d'évaluer le potentiel d'impact de la situation et d'identifier les axes à creuser ou améliorer, la grille synthèse de critères appliquée aux métaux est déclinée. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Principaux paramètres influents	Critères techniques et économiques	Situation
1. Pourcentage de matière recyclée incorporée	1.1 Taux d'incorporation minimum et cible maximum par matériau	80% (plus élevé que la borne haute mais la disponibilité ne semble pas être un problème compte tenu du non-démantèlement actuel des plateformes pétrolières)
	2.2 Propriétés thermiques	Acier : 1400-1500°C → Défavorable
2. Impact du procédé de recyclage : process et logistique	2.3 Qualité des déchets (type et origine)	Post-consommateur mais le métal a une haute valeur ajoutée
	2.4 Origine géographique de la matière secondaire	Nationale voire internationale (distance entre la plateforme en mer du Nord et le port de Londres) → Défavorable
	2.5 Chaîne logistique (nombre de sites impliqués)	Pas d'intermédiaire entre l'utilisateur et le générateur de métal recyclé c'est-à-dire qu'il n'y a qu'un site de production
	2.7 Valorisation des co-produits	Valorisation totale des co-produits Le démantèlement de la plateforme impose le traitement en fin de vie de tous les éléments qui la composent.
	3.1 Origine géographique de la matière secondaire	Transformation réalisée au Royaume-Uni (mix électrique 4 fois plus impactant sur le changement climatique que le mix français par exemple) → Défavorable
3. Taux de substitution de la matière première et qualité de la matière secondaire	3.2 Etapes préalables à la transformation (homogénéisation)	Oui, il est nécessaire de retirer certaines matières dangereuses comme l'amiante → Défavorable
	3.4 Qualité de la matière recyclée	Qualité équivalente
	4.1 Facteur déterminant (offre ou demande ?)	Offre (les plateformes pétrolières sont encore très peu démantelées et plusieurs seront bientôt hors d'usage donc l'offre est assez importante)
4. Ratio offre/demande	4.2 Ratio de prix recyclé/vierge	Prix de la tonne d'acier recyclé = 250€ + surcoût lié au démantèlement de 400 = 650€ La matière première coûte 850€. La situation reste favorable d'un point de vue comptable mais une étude de coûts plus poussée serait nécessaire. → Vigilance
	5.1 Impact de la matière vierge	A priori plutôt favorable pour l'acier mais il serait nécessaire d'évaluer avec une ACV l'impact du processus de démantèlement et de recyclage (qui est particulier à cette application) → Vigilance
5. Impacts évités	5.2 Valorisation en réemploi ou énergétique du gisement de déchets	Est-il possible de réemployer directement certaines parties de la structure ? Auquel cas le recyclage n'est pas complètement favorable Quels sont les risques sur les écosystèmes associés au démantèlement ? → Vigilance

En conclusion, il serait intéressant de creuser les critères 4.2, 5.1 et 5.2 avec respectivement une analyse des coûts et une analyse de cycle de vie, afin de mieux connaître les impacts du processus singulier de démantèlement (destruction des écosystèmes en place, perte de biodiversité...). La problématique de la logistique est bien traitée avec la réalisation de toutes les étapes sur un seul et même site de production. Pour autant, le transport de la structure depuis la mer du Nord jusqu'à Londres exige une logistique particulière. Il peut être pertinent également d'imaginer la logistique future de la structure en matière recyclée. Dans le cas présent, elle est installée relativement proche, mais quel serait l'impact si la nouvelle plateforme était installée dans le golfe de Guinée ? En outre, la réalisation

du processus de recyclage au Royaume-Uni présente un risque en termes d'impact lié au mix électrique utilisé.

Enfin, il faut garder en tête que cette grille est une synthèse des critères et qu'elle permet d'amorcer la démarche. Dans le cadre d'une prise de décision concrète sur l'intégration de recyclé (pour une filière de cette envergure), il serait nécessaire de poursuivre ce travail avec un approfondissement des critères présentés ici, ainsi que de ceux évoqués dans les différentes parties du rapport. De plus, il est à noter que le cas particulier des plateformes pétrolières traite d'enjeux multiples qui ne sont pas tous évalués ici : impacts sur la biodiversité marine, impacts sociaux, ... La méthode empreinte projet pourrait enrichir l'analyse de ce point de vue.

5. Conclusions

La transformation des déchets en ressources est une composante essentielle de l'économie circulaire. L'accélération des réglementations pour la mise en œuvre du recyclage soulève des questions relatives à la réduction d'impact permise par l'intégration de matières recyclées dans un produit.

Du fait de son recyclage en fin de vie, un matériau peut participer à plusieurs cycles de vie successifs : la question de l'allocation des impacts de la production primaire et du recyclage de cette matière aux cycles de vie successifs se pose. Nous avons donc dans le chapitre 2 de cette étude exploré 3 approches permettant la prise en compte de l'intégration de matière recyclée en ACV : la méthode Cut-off, la méthode Cut-off avec crédit (aussi appelée module D) et la Circular Footprint Formula (CFF).

Cette analyse a permis de souligner les points de convergence et de divergence entre ces méthodes. Globalement, l'amélioration des approches converge vers l'intégration d'un plus grand nombre de paramètres tout au long de la chaîne de valeur pour modéliser le processus de recyclage, induisant un chemin faisant une plus grande complexité de mise en œuvre.

L'exploration des labels a montré qu'au-delà du taux d'incorporation, peu d'information était tracée jusqu'au produit fini pour apporter des garanties à l'utilisateur sur les performances environnementales d'un produit intégrant des matières recyclées.

L'approche prônée par la méthode empreinte projet, pour la construction d'un arbre des conséquences, permet d'adresser l'enjeu conséquentiel et complexe du sujet de manière plus spécifique que ne le permettent actuellement les approches ACV, très coûteuses en données. Cela dit les paramètres mobilisés par l'approche CFF semblent recommandés jusqu'au niveau 3. Ce chapitre nous a permis d'identifier les 5 critères les plus influents sur les performances environnementales d'un produit contenant du recyclé.

Pour qu'une matière soit considérée comme recyclable il est nécessaire que les matières utilisées soient effectivement traitées dans des filières de collecte organisées, que l'état des lieux des techniques industrielles permette l'extraction du produit ou du composant en vue de son recyclage effectif et enfin que le matériau recyclé trouve un marché, compte tenu de ses caractéristiques techniques et de son prix.

Les performances environnementales résultent directement de nombreux critères techniques et économiques propres aux matériaux, aux filières et au produit qui incorpore cette matière recyclée. Le niveau de maturité et de déploiement des filières induit d'importantes variations entre la situation actuelle observée et une situation qui serait optimisée d'un point de vue environnemental. Ces constats nous ont mené à établir un premier ensemble de seuils minimum et maximum relatifs à l'incorporation de matière recyclée dans un produit, reflétant la situation actuelle pour chaque matériau.

Dans le dernier chapitre, nous avons proposé une grille permettant de guider un fabricant de ou un acheteur un produit incorporant de la matière recyclée dans son diagnostic. A partir de 6 paramètres déclinés selon 1 à 7 critères, l'utilisateur peut ainsi identifier les critères favorables à une réduction d'impact environnemental et ceux risquant de conduire à un impact équivalent ou supérieur par rapport à un produit composé à 100% de matériaux vierge. Cette grille permet également d'identifier les situations de vigilance où une analyse approfondie doit être menée (ACV, empreinte projet) pour prendre une décision. Cette grille constitue une première base d'intégration de la complexité soulignée dans les chapitres 2 et 3. Une appropriation de l'approche permettrait une analyse plus fine et une mise à jour en fonction de l'état des connaissances, qui évolue très vite.

ANNEXES

Annexe 1 : Liste des publications consultées

Plastiques :

- Effets du recyclage sur les polymères chargés, Balhouli et al. – présentation 2012
- Effect of recycled content and rPET quality on the properties of PET bottles, Chacon et al. – Wiley 2019
- Use of recycled HDPE in pipes, Istrate et al. – Journal of Cleaner Production 2021
- Plastic recycling in a circular economy; determining environmental performance through an LCA matrix model approach, Schwarz et al. – Elsevier 2020
- Technical and market substitutability of recycled materials: Calculating the environmental benefits of mechanical and chemical recycling of plastic packaging waste, S. Huysveld et al. – Elsevier 2022

Métaux (acier) :

- MTD UE 2022 Métaux ferreux
- Influence of Input-Scrap Quality on the Environmental Impact of Secondary Steel Production, Vadenbo et al. – Journal of Industrial Ecology 2016
- The circular aspects and recycling of materials in the aerosol industry, Niemiec et al. – International Journal of Manufacturing Economics and Management 2021
- Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash, Allegrini et al. – Journal of Environmental Management 2015

Verre creux :

- MTD UE 2010 Verre
- Closed loop supply chain for glass recycling: current practices and challenges, Carr et al. – International Journal of Integrated Supply Management 2018
- Eco-efficient waste glass recycling: Integrated waste management and green product development through LCA, Blengini et al. – Elsevier 2021
- Is Open-Loop Recycling the Lowest Preference in a Circular Economy ? Answering Through LCA of Glass Powder in Concrete, Deschamp et al. – Journal of Cleaner Production 2018

Annexe 2 : Liste des personnes consultées

Plastiques :

- SRP / Olivier Vilcot - olivier.vilcot@suez.com
- IPC / Yves Schmitt – yves.schmitt@ct-ipc.com

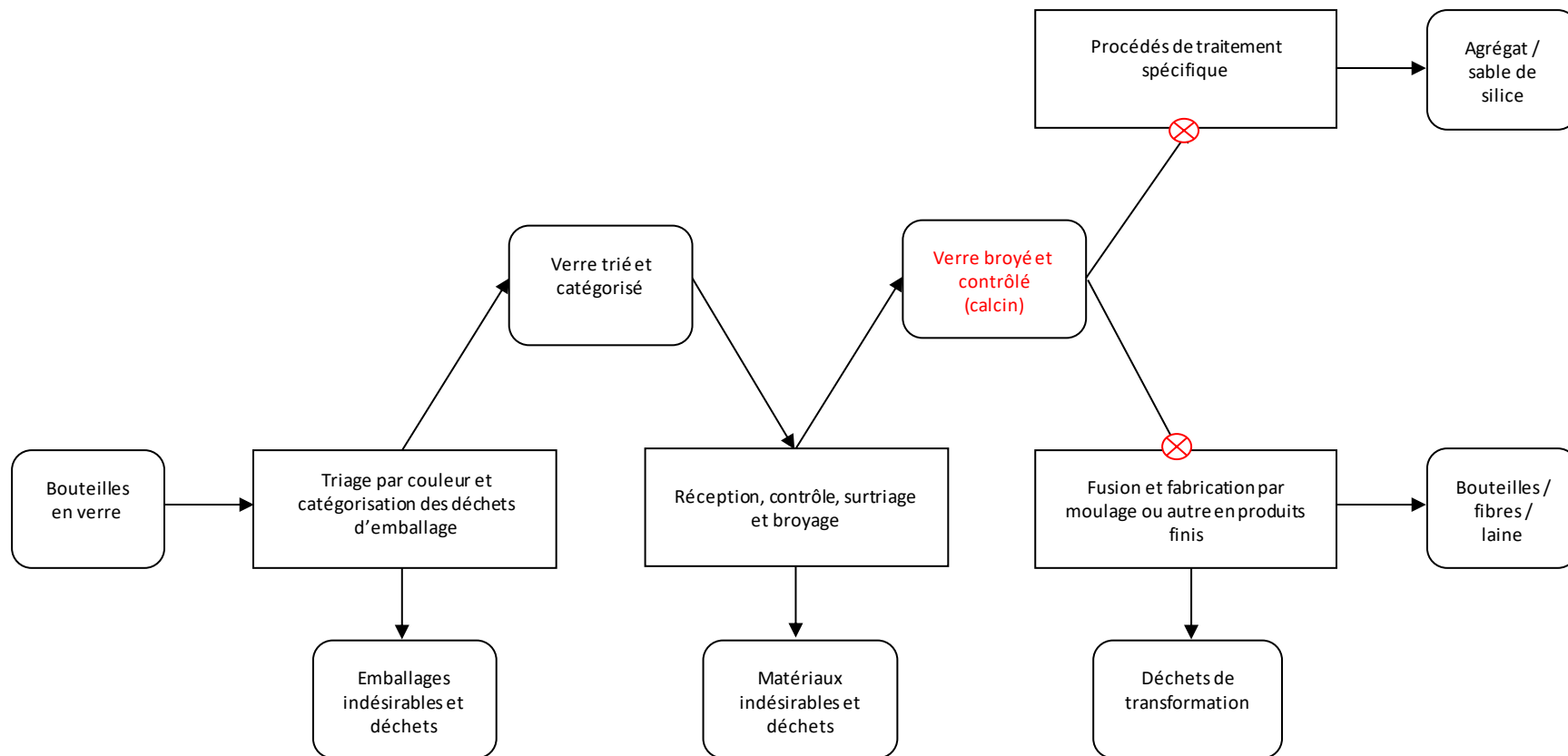
Métaux (acier) :

- SNFBM / Claudie Mathieu - c.mathieu@snfbm.fr
- ARCELOR-MITTAL / Catherine Jung - catherine.jung@arcelormittal.com

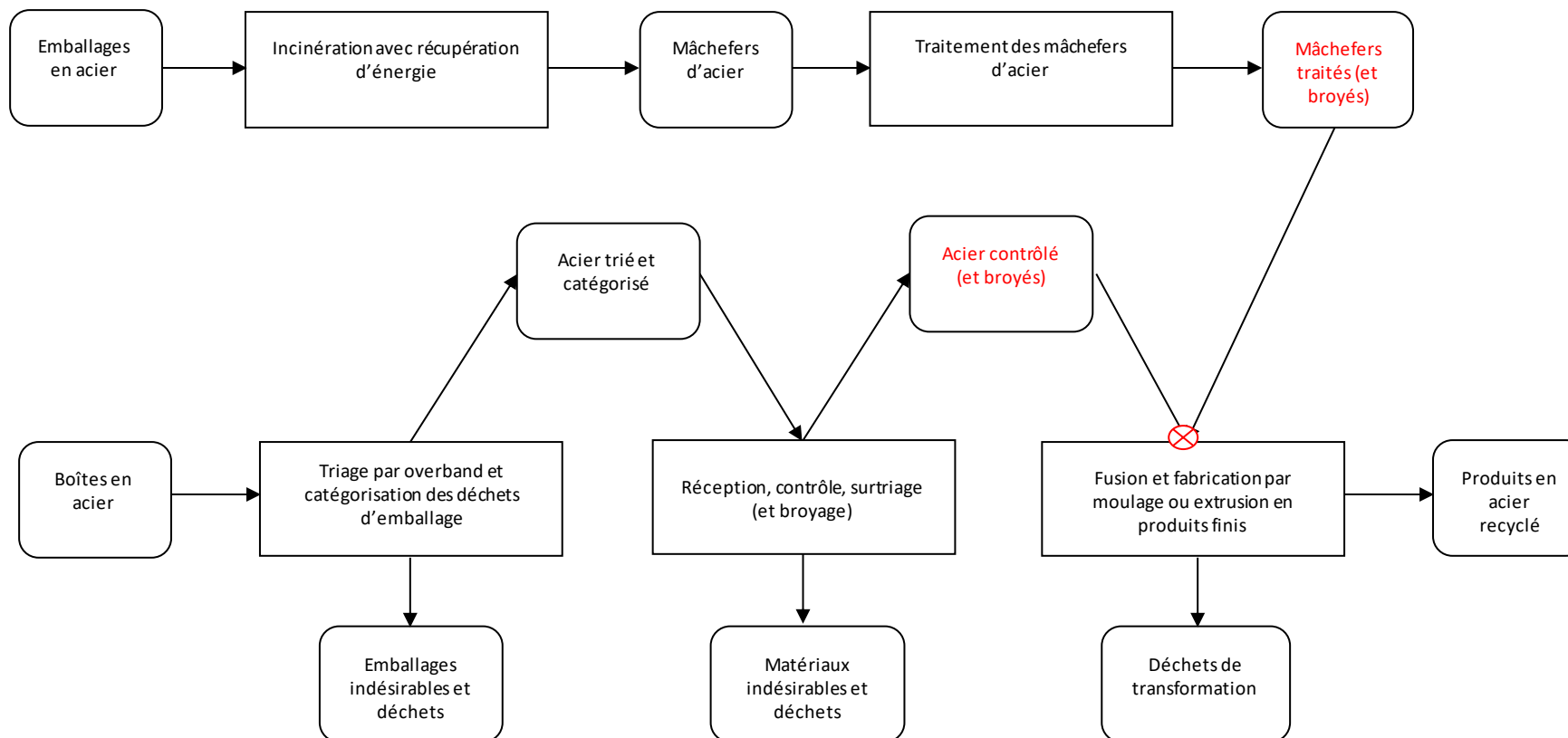
Verre creux :

- Fédération du Verre / Jacques Bordat - jacques.bordat@fedeverre.fr
- Centre de traitement du verre OI / Christophe Baron - christophe.baron@o-i.com

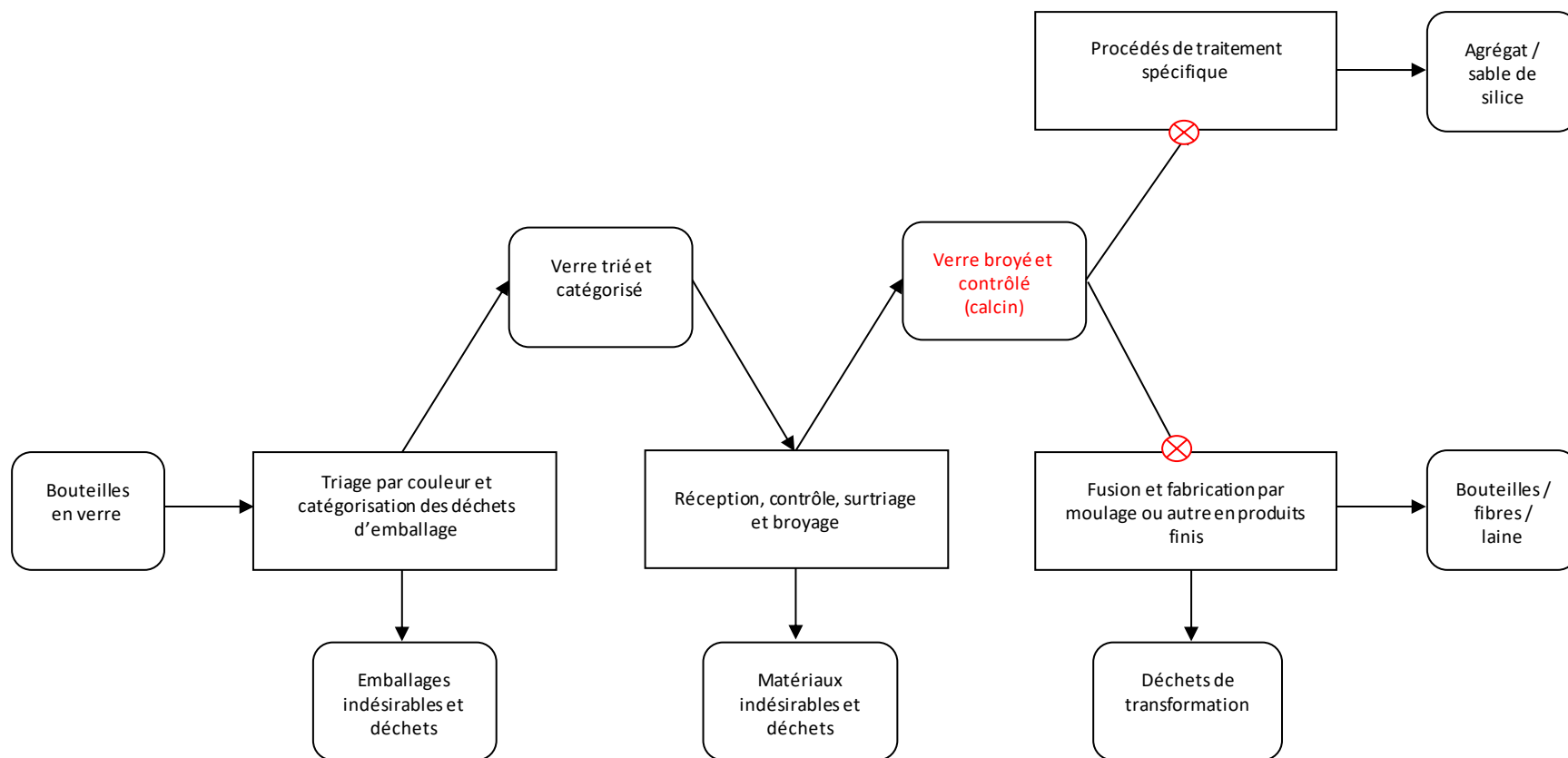
Annexe 3-A : Organigramme de la filière de recyclage des matières plastiques



Annexe 3-B : Organigramme de la filière de recyclage de l'acier



Annexe 3-C : Organigramme de la filière de recyclage du verre creux



Annexe 4 : Etablissement des fourchettes de seuils d'incorporation selon les contraintes environnementales

Synthèse des taux d'incorporation	Seuils techniques			Seuils économiques			Préconisation de seuils		
	Facteur	Valeur	Variabilité	Facteur	Valeur	Variabilité	Fourchette	Variabilité	Réalité FR
Plastiques (différentes matières)	Perte de propriétés mécaniques (10% par cycle) ou visuelles avec risque d'augmentation des quantités unitaires ou de compensation chimique	Max. 30%	Assez faible	Insuffisance de la disponibilité locale de qualité avec risque d'impact logistique (y compris importation)	Max. 40%	Assez élevée	Max. 30% Min. 20%	Elevée	0% - 80% (moy. environ 20%)
	Multiplicité des sources de déchets avec risque d'ajout d'une étape et de charges pour homogénéisation	Max. 60% ?	Elevée	Stockage dans la durée des déchets avec risque sur la qualité	Min. 20%	Assez faible			
	Complexité de certains procédés (bi-injection) avec risque d'incrément de consommation énergétique	Oui -> Min. 20% ?	Très élevée	Amortissement de l'immobilisation matérielle en transformation et en négociation	Min. 20%	Faible			
Métaux (acier)	Qualité des flux approvisionnés faute de tri avant process avec risque d'incrément de consommation énergétique	Max. 100% hors mâchefers et aérosols	Elevée	Insuffisance de la disponibilité locale de qualité avec risque d'impact logistique (y compris importation)	Max. 50% (cf. % actuel)	Assez élevée	Max. 50% hors mâchefers et aérosols Min. 20%	Assez élevée	0% - 100% (moy. 47%)
	Efficacité supérieure à partir d'une certaine proportion recyclée avec risque sur changement climatique	Min. 30% ?	Assez faible	Amortissement de l'immobilisation matérielle en transformation et en négociation	Min. 20%	Faible			
Verre creux	Qualité des flux approvisionnés selon difficultés de tri en amont (vitro-céramique et bouchons) avec risque d'arrêt de process	Max. 100%	Assez faible	Insuffisance de la disponibilité locale de qualité avec risque d'impact logistique (y compris importation)	Max. 60% (cf. % actuel)	Assez faible	Max. 60% Préférence pour verre blanc Min. 30%	Assez faible	0% - 100% (moy. 61%)
	Ajout d'additifs sur verre blanc pour emballages colorés	Verre coloré -> Max. 70% ?	Assez élevée	Amortissement de l'immobilisation matérielle en transformation et en négociation	Min. 30%	Faible			

Annexe 5 : Impacts évités du recyclage : ratio impact matière vierge / matière recyclée

Le critère 5.1 de la grille de critère définie en section 2. Les méthodologies de prise en compte de l'intégration de matières recyclées en évaluation environnementale ou Approche méthodologique porte sur « l'impact de la matière vierge et de la matière recyclée ». En effet, un bénéfice à l'emploi de matière recyclée s'opère lorsque de manière comptable le ratio (R) suivant est élevé :

$$R = \frac{\text{impact matière vierge}}{\text{impact matière recyclée}}$$

Pour donner une première indication, le ratio (R) a été calculé sur certaines matières. Les résultats sont présentés Figure 28.

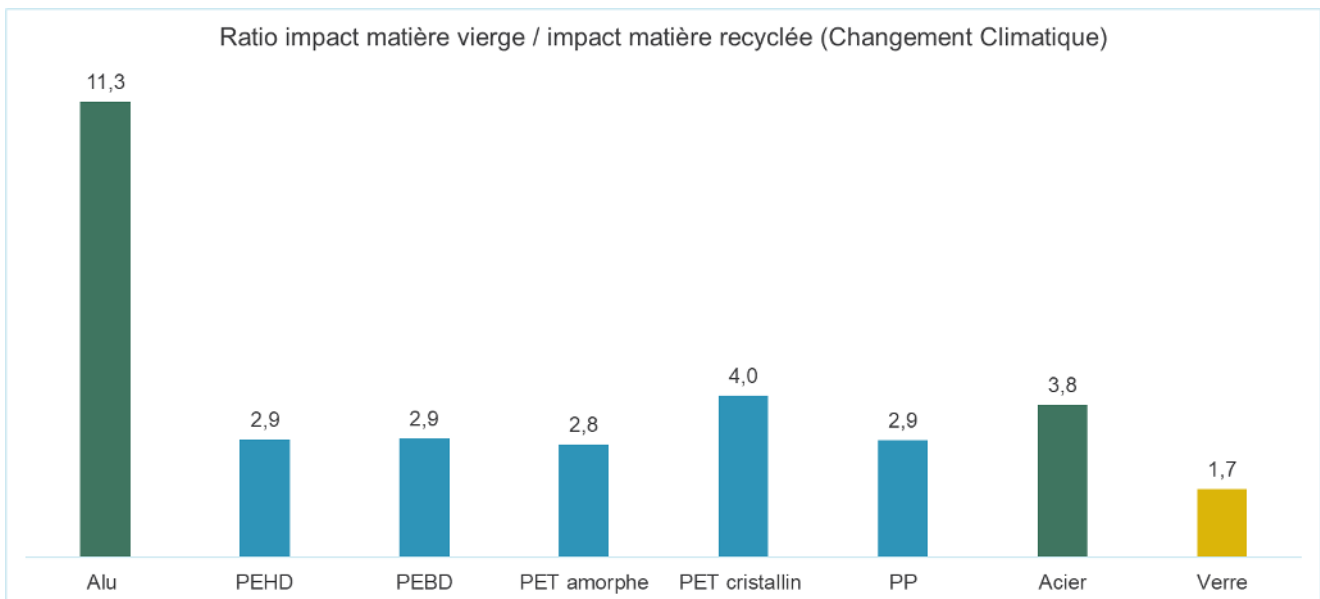


Figure 28 calcul du ratio (R) pour le critère 5.1 de la grille de critères

Ces résultats sont génériques et sont à utiliser uniquement dans le cadre de l'utilisation de la grille de critères. Pour aller plus loin en étudiant des matériaux non représentés ici ou sur des situations spécifiques, une analyse de cycle de vie est nécessaire et permettra de calculer un ratio (R) plus proche de la réalité. Pour générer ces résultats, la base de données Ecoinvent 3.9 a été utilisée avec la méthode de caractérisation EF3.1.

La tendance suivante et observée dans les résultats :

1. $R > 4$: le recyclage est extrêmement favorable. C'est le cas de l'aluminium ;
2. $2 < R < 4$: le recyclage est très favorable. C'est le cas de toutes les matières plastiques étudiées et de l'acier ;
3. $1 < R < 2$: le recyclage est favorable. C'est le cas du verre ;
4. $R < 1$: le recyclage est défavorable. Non observé dans les matières étudiées.

Annexe 6 : Mise en œuvre des approches ACV sur un exemple (plastique)

Les différentes méthodologies présentées dans la section 2. Les méthodologies de prise en compte de l'intégration de matières recyclées en évaluation environnementale ou Approche méthodologique influent sur l'impact alloué à la matière première (intégrant ou non de la matière recyclée), à la fin de vie de la matière et à l'impact total. L'objectif de cette annexe est d'illustrer par un exemple l'influence de l'utilisation des différentes méthodologies sur l'impact ACV.

Présentation de l'exemple applicatif

Le **contexte** est le suivant : un fabricant de boissons en bouteille achète du **PET vierge** pour l'emballage de ses produits. Dans le cadre d'une **analyse de cycle de vie** d'un de ses produits, il souhaite **changer son sourcing matière par du PET contenant 50% de matière recyclé** (d'origine Europe).

L'**objectif** est donc d'observer comment le **choix de la méthodologie de modélisation du recyclage influence les résultats ACV** et génère des **différences sur la répartition des impacts** des étapes du cycle de vie. L'exemple sera mené pour **une bouteille de 100 g** en PET.

Les méthodologies mises en œuvre au travers de cet exemple sont les suivantes : **Cut-Off, Cut-Off avec crédit et CFF**.

Pour que l'exemple soit proche d'une situation industrielle, nous avons émis les hypothèses suivantes sur le cycle de vie :

- Matériaux et composition de la bouteille :
 - 50% de PET vierge (pétrosourcé) ;
 - 50% de PET recyclé (mécaniquement) ;
 - Additifs anti-UV, antioxydants, agents de glissement, de moulage etc ... → négligés ;
- Mise en forme matière : injection soufflage ;
- Transport : 500 km par camion entre le fournisseur et l'usine de production des bouteilles.

Modélisation avec les différentes méthodologies

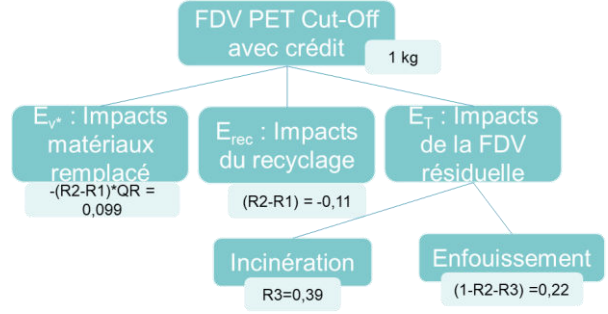
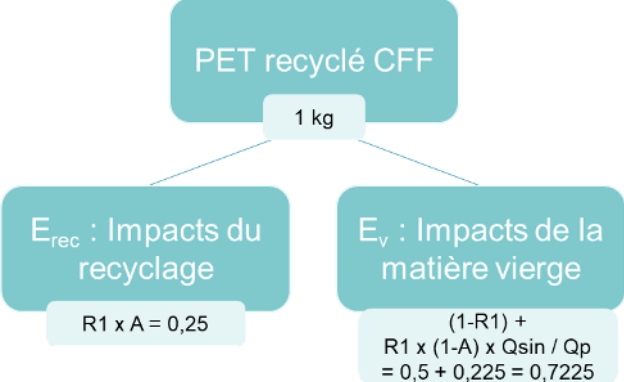
Pour modéliser l'intégration de recyclé et la fin de vie de matières, des données génériques sont nécessaires. Ces données rendent compte de l'état du marché de cette matière recyclée, de la qualité de la matière secondaire ou bien des taux de recyclage de cette matière. Ainsi, nous avons utilisé de manière homogène les données de la commission européenne mises à disposition pour la mise en œuvre de la CFF dans l'annexe C⁴¹ pour la modélisation des différentes méthodologies.

Paramètre	Valeur	Source
R1	0,5	Enoncé de l'exemple
R2	0,39	Annexe C (France)
A	0,5	Annexe C
QR, Qsin/Qp ou Qsout/Qp	0,9	Annexe C
R3	$(1-R2)*0,64=0,3904$	Annexe C (France)

Tableau 20 Paramètres génériques utilisés pour la modélisation de l'exemple

⁴¹ Annexe C, commission européenne, <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.html>

Méthodologie	Partie	Hypothèse modélisation	Schématisation de la modélisation pour 1 kg de PET
Cut-Off	Matière	100% de l'impact du recyclage est alloué à la matière secondaire	
	FDV (fin de vie)	100% de l'impact du recyclage est alloué à la matière secondaire → Impact du recyclage en fin de vie = 0, sauf transport de collecte → Seul l'impact de la FDV résiduelle (incinération, enfouissement) est à considérer	
Cut-Off plus crédit	Matière	La frontière est définie lorsque la matière sort de son statut de déchet	
	FDV + module D	Toutes les activités de recyclage ont lieu après la fin du statut de déchet du PET (pas de prétraitement), sauf pour le transport de collecte qui est alloué à la fin de vie → 100% de l'impact du recyclage est alloué à la matière secondaire	

		<p style="text-align: center;">$E_{\text{Cut-Off-AC}} = (R2 - R1) \times (ERec_{\text{postd\u00e9chet}} - E^* \times QR)$</p> <p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> • $E_{\text{Cut-Off-AC}}$: l'impact environnemental du Module D ; • R1 est la part de recycl\u00e9 dans le produit ; • R2 est le taux de recyclage du mat\u00e9riau apr\u00e8s utilisation du produit ; • $ERec_{\text{postd\u00e9chet}}$: les charges associ\u00e9es aux processus de recyclage et de r\u00e9cup\u00e9ration au-del\u00e0 des fronti\u00e8res du syst\u00e8me (transport, tri, broyage, etc.) une fois que le flux de mati\u00e8res recyclables n'a plus le statut de d\u00e9chet ; • E^* : les b\u00e9n\u00e9fices de l'impact li\u00e9 \u00e0 la baisse d'utilisation des mati\u00e8res et combustibles primaires (vierges) ; • QR : facteur de correction de qualit\u00e9 ($QR = QR_{\text{out}}/QR_{\text{remp}}$) <p>+ l'impact de la FDV r\u00e9siduelle (incin\u00e9ration, enfouissement) \u00e0 consid\u00e9rer</p> <p>NB : ici $R1 > R2$ donc flux net n\u00e9gatif \rightarrow pas d'obligation de d\u00e9clarer le module D (contexte FR)</p>	
CFF	Mati\u00e8re	Aucune hypoth\u00e8se \u00e9mise	

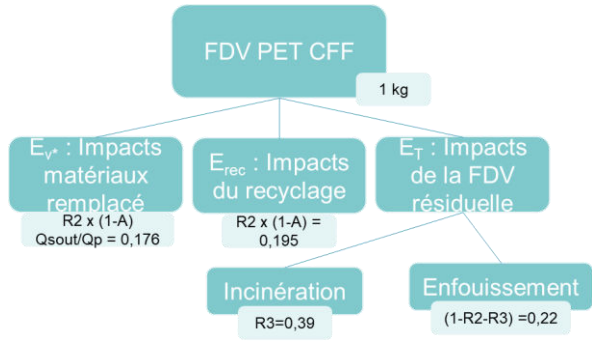
	FDV	Aucune hypothèse émise	 <pre> graph TD Root["FDV PET CFF 1 kg"] --> Ev["E_v : Impacts matériaux remplacés R2 x (1-A) Qsout/Qp = 0,176"] Root --> Erec["E_rec : Impacts du recyclage R2 x (1-A) = 0,195"] Root --> ET["E_T : Impacts de la FDV résiduelle"] ET --> Incin["Incinération R3=0,39"] ET --> Enfou["Enfouissement (1-R2-R3)=0,22"] </pre>
--	-----	------------------------	--

Tableau 21 Hypothèses et schématisation de la modélisation pour chaque méthodologie

Résultats et interprétations

Les résultats de l'ACV sont présentés sur l'indicateur changement climatique Figure 29.

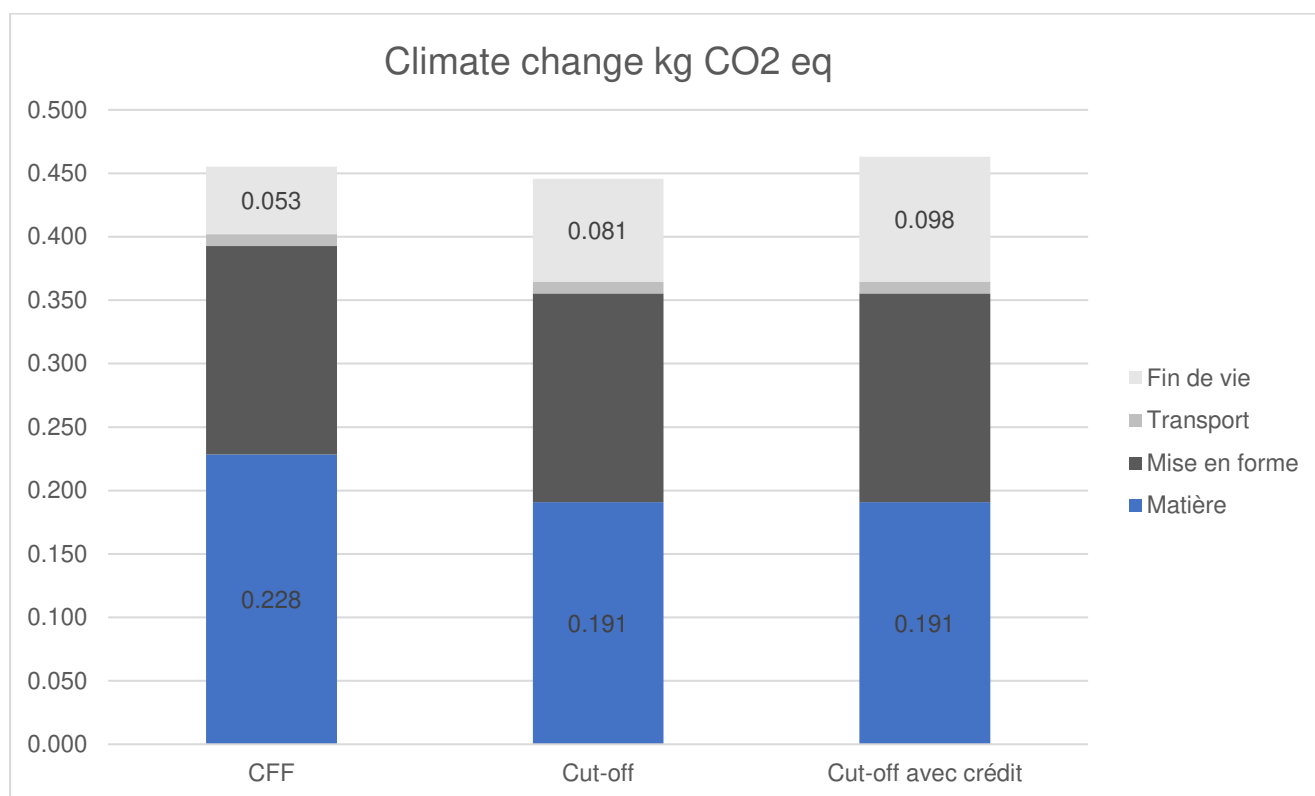


Figure 29 Résultats ACV pour une bouteille de 100g sur le changement climatique avec la méthodologie CFF, Cut-Off et Cut-Off avec crédit

Pour l'interprétation, nous analyserons les résultats en utilisant la méthodologie **Cut-Off comme référence** car elle est plus simple, varie moins et sert de base aux autres méthodologies.

Concernant la méthodologie **CFF**, la **partie matière** est impactante en raison de la prise en compte d'une partie de matière vierge non incluse dans le matériau. A l'inverse, la partie **fin de vie** a un impact réduit grâce à la prise en compte d'un bénéfice lié à la non-utilisation de matière vierge grâce au recyclage. L'impact total est proche de Cut-Off dans ce cas (car $A=0,5$ et Q proche de 1).

La méthodologie **Cut-off avec crédits** est mise en œuvre ici dans le cas particulier où de $R1 > R2$, ce qui implique donc que le module D est positif, donc la **fin de vie** est impactante. Concernant la partie matière, elle est identique au **Cut-off**.

Analyse de sensibilité : influence du taux d'incorporation de recyclé R1

A travers cette analyse de sensibilité, nous souhaitons étudier l'influence du taux d'incorporation de recyclé sur les résultats et observer comment R1 agit sur la contribution à l'impact de la **matière** et de la **fin de vie** ainsi qu'à l'impact **total**. Pour cela, nous comparons **trois valeurs de R1 : 25%, 50% et 75%**.

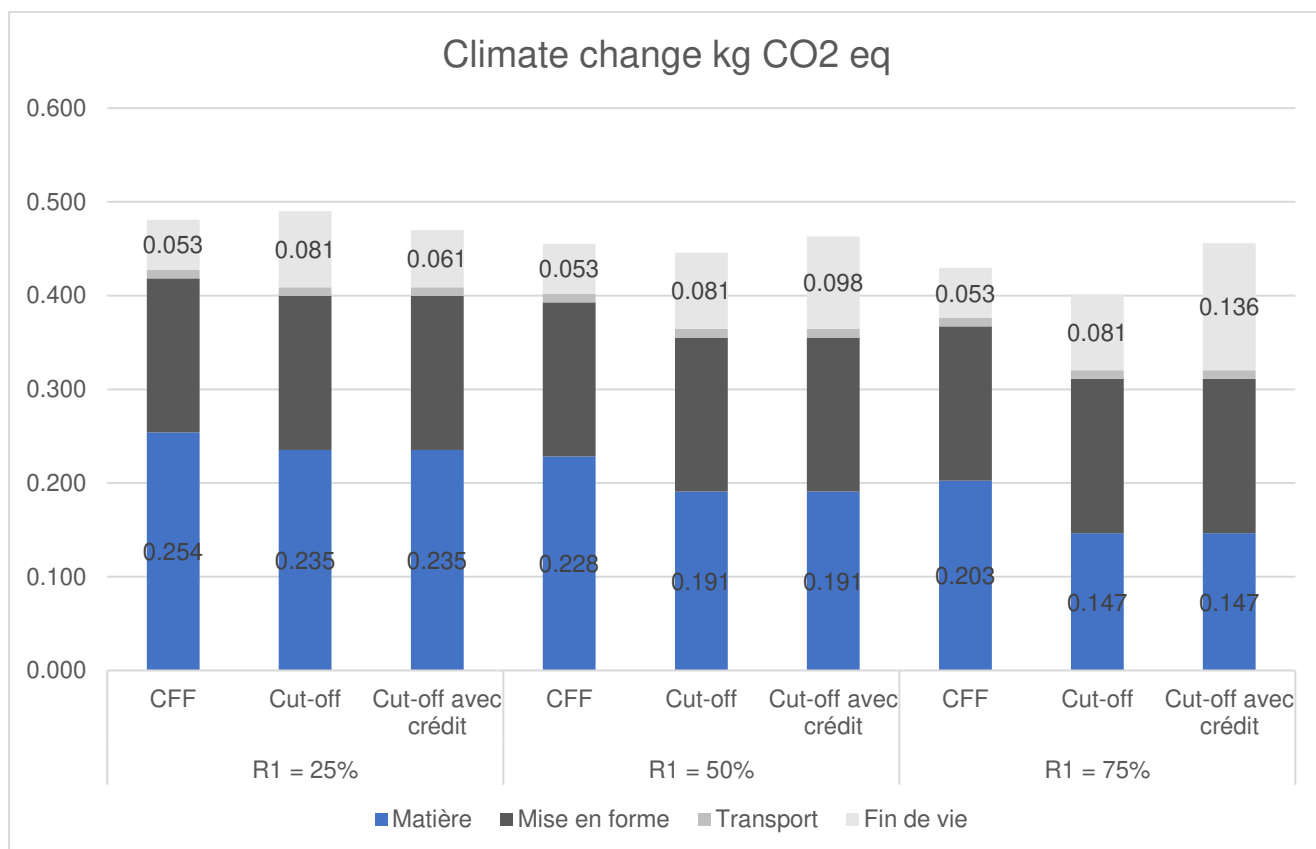


Figure 30 Résultats ACV pour une bouteille de 100g sur le changement climatique avec la méthodologie CFF, Cut-Off et Cut-Off avec crédit avec R1=25%, R1=50% et R1=75%

Pour analyser les résultats présentés [Figure 30](#), nous allons utiliser deux grilles d'analyse :

- Etude de l'influence de R1 pour une même méthodologie en prenant R1 à 50% comme référence (exemple : Cut-Off (R1_50%) vs Cut-Off (R1_75%)). Résultats présentés Tableau 22 ;
- Etude de l'influence de la méthodologie pour un même R1 en utilisant Cut-Off comme référence (exemple : CFF(R1_25%) vs Cut-Off(R1_25%)). Résultats présentés Tableau 23.

		Matière	Fin de vie	Total
R1 = 25%	CFF	11%	0%	6%
	VS Cut-off	23%	0%	10%
R1 = 50%	Cut-off avec crédit	23%	-38%	2%
R1 = 75%	CFF	-11%	0%	-6%
	VS Cut-off	-23%	0%	-10%
R1 = 50%	Cut-off avec crédit	-23%	38%	-2%

Tableau 22 grille d'analyse de l'influence de R1 pour une même méthodologie

La [Figure 30](#) et le [Tableau 22](#) nous permettent de conclure que :

- De manière générale, **plus R1 augmente plus l'impact total diminue** grâce à une diminution de l'impact **matière** pour toutes les méthodologies ;
- En revanche, avec R1 à 50% et à 75% nous sommes dans le cas spécifique où R1>R2 et donc un module D positif qui augmente l'impact de la **fin de vie** pour la méthodologie Cut-Off avec crédit, ainsi, on observe uniquement 3% de réduction d'impact **total** entre un R1 à 25% et un R1 à 75%.

		Matière	Fin de vie	Total
R1 = 25%	CFF VS Cut-off	8%	-34%	-2%
	Cut-off avec crédit VS Cut-off	0%	-25%	-4%
R1 = 50%	CFF VS Cut-off	20%	-34%	2%
	Cut-off avec crédit VS Cut-off	0%	21%	4%
R1 = 75%	CFF VS Cut-off	38%	-34%	7%
	Cut-off avec crédit VS Cut-off	0%	67%	14%

Tableau 23 grille d'analyse de l'influence de la méthodologie pour un même R1

La *Figure 30* et le *Tableau 23* nous permettent de conclure que :

- Plus R1 est grand, plus l'impact **total** avec les méthodologies CFF et Cut-Off avec crédit est élevé en comparaison de Cut-Off. A noter que lorsque R1 est faible (25%), alors l'impact **total** est plus faible pour ces deux méthodologies ;
- Plus R1 est grand, plus la partie **matière** de la méthodologie CFF est impactante en comparaison avec Cut-Off. Cela s'explique car plus R1 est grand plus la part considérée de vierge non contenue réellement dans le produit est grand ($R1 \times (1-A) \times Q_{sin} / Q_p$). Pour rappel, cette part de la CFF est là pour équilibrer les bénéfices en **fin de vie** ;
- R1 n'intervient pas dans la **fin de vie** pour les méthodologies Cut-Off et CFF, l'écart est donc fixe entre les deux méthodologies pour cette partie ;
- R1 agit sur le module D qui influe sur la partie **fin de vie** :
 - Quand R1 est à 25%, $R1 < R2$ et le module D est négatif ce qui abaisse l'impact du Cut-Off avec crédit en comparaison avec le Cut-Off ;
 - Quand R1 est à 50 ou 75%, $R1 > R2$ et le module D est positif ce qui crée une charge et augmente l'impact.

Annexe 7 : Construction d'un arbre des conséquences grâce à la méthode empreinte projet – exemple d'un atelier de recyclage de fenêtres

L'objectif de ce projet est d'évaluer les impacts et bénéfices environnementaux liés au fonctionnement d'un atelier de recyclage de fenêtres en fin de vie sur un an (soit 15 tonnes de fenêtres traitées) et de suivre in fine la performance environnementale du projet.

Ces fenêtres en fin de vie étaient initialement destinées à l'enfouissement et sont déconstruites de manière semi-automatisée, avec valorisation des différents éléments les composant :

- Le verre est transformé en microbilles ;
- Le bois est traité thermiquement avec récupération d'énergie ;
- Le PVC est transformé en granulés pour être réinjecté ;
- L'aluminium est recyclé pour former de nouvelles pièces.

Le niveau d'approche de la méthode empreinte projet utilisé est de 3 – Quantitatif simplifié. L'arbre des conséquences construit est le suivant :

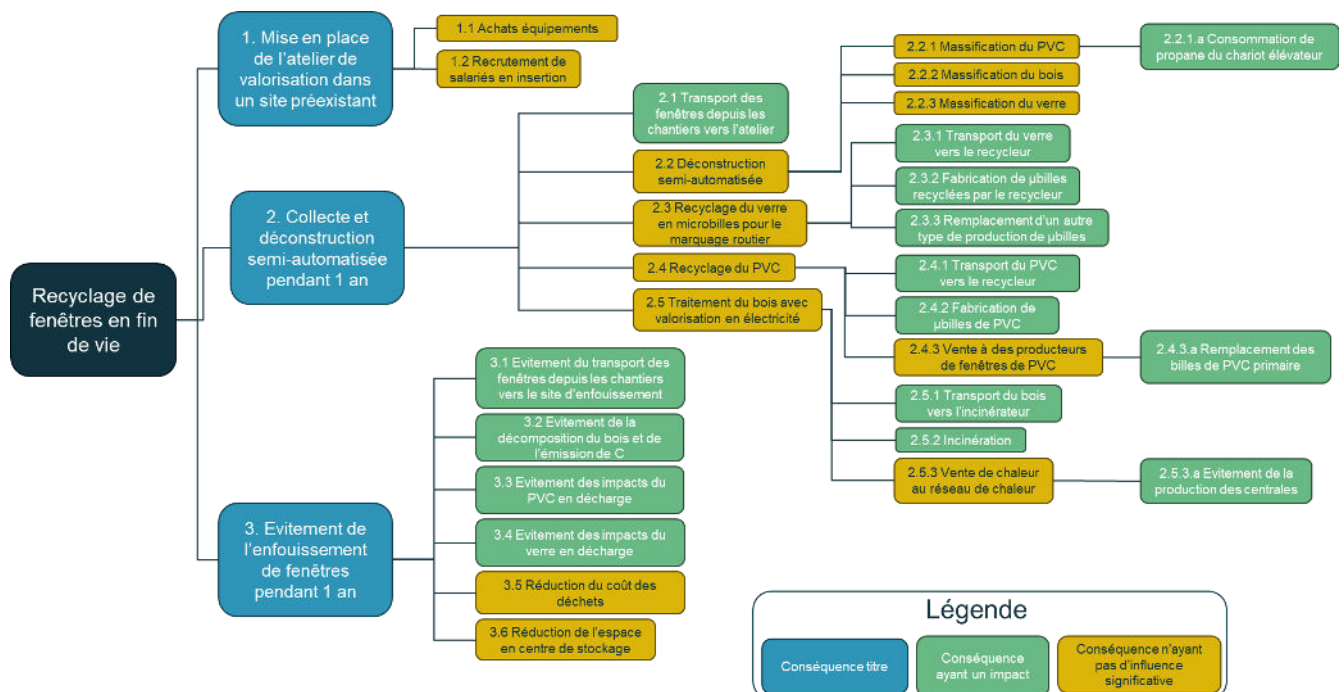


Figure 31 Arbre des conséquences de l'atelier de recyclage de fenêtres étudié

Les résultats obtenus suite à l'ACV réalisée sont les suivants :

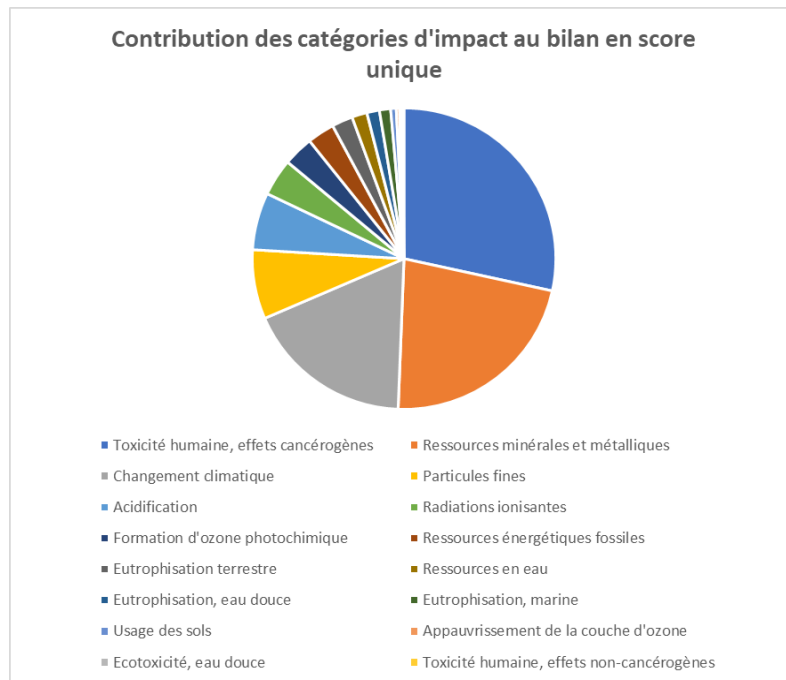


Figure 32 Analyse d'impacts environnementaux de la mise en place de l'atelier de recyclage de fenêtres

	Charges supérieures aux bénéfiques	Ecarts non significatifs	Bénéfices supérieurs aux charges
Indicateurs pertinents		Toxicité humaine, effets cancérogènes	Changement climatique Particules fines Acidification Ressources minérales et métalliques
Autres indicateurs	Radiations ionisantes	Toxicité humaine, effets non-cancérogènes Ecotoxicité, Eau douce	Appauvrissement de la couche d'ozone Formation d'ozone photochimique Eutrophisation terrestre Eutrophisation eau douce Eutrophisation marine Usage des sols Ressources en eau Ressources énergétiques fossiles

Tableau 24 bénéfices environnementaux selon les catégories d'impacts étudiées

Les principaux bénéfices environnementaux que permettent la mise en place et le fonctionnement de cet atelier sont associés à la production de microbilles de verre et du PVC recyclé, évitant ainsi la production de matériaux primaires.

Le projet affecte plus particulièrement 5 catégories d'impacts :

- La toxicité humaine (effets cancérogènes) ;
- L'épuisement des ressources minérales et métalliques ;

- Le changement climatique ;
- L'émission de particules fines ;
- L'acidification des sols et des eaux.

Ce projet présente des bénéfices environnementaux pour les 4 dernières catégories.

Il est à noter que cette évaluation a été réalisée avec le niveau 3 de la méthode Empreinte Projet, ce qui permet de fournir uniquement des résultats préliminaires, avec des valeurs valides en ordre de grandeur, sans analyse de fiabilité de l'évaluation. Une analyse plus poussée serait par exemple nécessaire sur l'indicateur de toxicité, afin de confirmer les bénéfices engendrés par le projet. Des analyses de sensibilité permettraient par ailleurs de s'assurer que le projet permet bien d'engendrer des bénéfices environnementaux dans d'autres cas de figures alternatifs.

En outre, les résultats ne pourraient pas être utilisés pour communiquer sur une performance environnementale quantifiée du projet, ou pour une comparaison avec un autre projet similaire.