



HAL
open science

Développement d'outils d'aide à la décision en conception pilotés par l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit et l'outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie

Jorge Martinez-Leal

► To cite this version:

Jorge Martinez-Leal. Développement d'outils d'aide à la décision en conception pilotés par l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit et l'outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie. Autre [cond-mat.other]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2019. Français. NNT : 2019ENAM0062 . tel-02939064

HAL Id: tel-02939064

<https://pastel.hal.science/tel-02939064>

Submitted on 15 Sep 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'ingénieur

Doctorat

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Conception "

présentée et soutenue publiquement par

Jorge MARTINEZ LEAL

le 19 décembre 2019

**Développement d'outils d'aide à la décision en conception
pilotés par l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit
et l'outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie**

Directeur de thèse : **Nicolas PERRY**

Co-encadrement de la thèse : **Carole CHARBUILLET, Stéphane POMPIDOU**

Jury

M. Michel DUMON, Professeur des Universités, LCPO, Université de Bordeaux Président
M. Didier PERRIN, Maître-Assistant, C2MA, IMT Mines Alès Rapporteur
Mme Tatiana REYES, Maître de Conférences, CREIDD, Université de Technologie de Troyes Rapporteur
M. Daniel FROELICH, Professeur des Universités, LCPI, ENSAM Examineur
M. Nicolas PERRY, Professeur des Universités, I2M, ENSAM Examineur
Mme Maud RIO, Maître de Conférences, G-SCOP, Université Grenoble Alpes Examinatrice
M. Erwan AUTRET, Coordinateur du Pôle Conception, ADEME Invité
Mme Carole CHARBUILLET, Ingénieur de recherche, I2M, ENSAM Invitée
M. Olivier MANTAUX, Maître de Conférences, I2M, Université de Bordeaux Invité
M. Stéphane POMPIDOU, Maître de Conférences, I2M, Université de Bordeaux Invité

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'ingénieur

Doctorat

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité “ Conception ”

présentée et soutenue publiquement par

Jorge MARTINEZ LEAL

le 19 décembre 2019

**Développement d'outils d'aide à la décision en conception
pilotés par l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit
et l'outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie**

Directeur de thèse : **Nicolas PERRY**

Co-encadrement de la thèse : **Carole CHARBUILLET, Stéphane POMPIDOU**

Arts et Métiers – Campus de Bordeaux-Talence

Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux, Département Ingénierie Mécanique et Conception

*“Una sociedad poseída por el frenesí de producir más para consumir más
tiende a convertir las ideas, los sentimientos, el arte,
el amor, la amistad y las personas mismas en objetos de consumo”*

Octavio Paz

Remerciements

Ce travail a été réalisé à l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M), unité mixte de recherche CNRS, Université de Bordeaux, Bordeaux INP, INRAE et Art et Métiers. Il a été financé par l'ADEME et AMVALOR.

Je tiens tout d'abord à remercier l'ADEME qui a soutenu le sujet proposé, validé ses objectifs et financé cette recherche. Je remercie tout particulièrement Mme Hélène Bortoli-Puig, coordinatrice du Pôle Écoconception de l'ADEME, et M. Erwan Autret qui lui a succédé à cette fonction, pour leur implication dans ma réflexion, leur suivi régulier et les nombreux et riches échanges qui ont accompagné ce travail jusqu'à sa soutenance.

Monsieur Jean-Christophe Batsale, Professeur de l'Université de Bordeaux et Directeur de l'I2M, m'a permis d'effectuer ce travail au sein du laboratoire. Que l'ensemble de l'Institut, et tout particulièrement les membres du Département Ingénierie Mécanique et Conception (IMC), trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je tiens à remercier M. Michel Dumon, Professeur de l'Université de Bordeaux, pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant mon jury.

J'adresse mes remerciements à M. Didier Perrin, Maître-Assistant de l'École des Mines d'Alès, pour avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse. Je le remercie particulièrement pour la qualité de ses remarques qui m'ont permis d'améliorer mon travail.

Mes remerciements vont également à Mme Tatiana Reyes, Maître de Conférences à l'Université de Technologie de Troyes, pour l'intérêt qu'elle a portée à mon travail en acceptant d'en être la rapporteure. Ses remarques et les discussions que nous avons pu avoir à l'occasion de nos quelques rencontres pendant la thèse m'ont permis de prendre du recul sur ma recherche.

Remerciements

Je tiens à remercier M. Daniel Froelich, Professeur de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, d'avoir accepté de participer au jury de thèse et d'avoir rapporté mon travail lors du comité de suivi. Merci pour l'ensemble de vos remarques qui m'ont fourni nombre de pistes de recherche.

Je remercie également Mme Maud Rio, Maître de Conférences de l'Université Grenoble Alpes, d'avoir accepté de participer au jury. Merci pour les échanges enthousiastes qui m'ont permis d'envisager mon travail sous un autre angle. Merci également pour les discussions que nous avons eues lors des séminaires de recherche du réseau EcoSD.

Je souhaiterais aussi adresser ma sincère gratitude à M. Olivier Mantaux, Maître de Conférences de l'Université de Bordeaux, d'avoir accepté de participer à mon jury et pour avoir encadré mon stage de master, quelques années auparavant.

Que M. Erwan Autret, coordinateur du Pôle Conception à l'ADEME, trouve ici l'expression de toute ma gratitude pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse. Je le remercie une nouvelle fois pour nos nombreux échanges.

Je tiens également à remercier mes encadrants.

En premier lieu je souhaiterais remercier mon Directeur de thèse, Nicolas Perry, de m'avoir proposé de travailler sur ce sujet et d'être toujours resté enthousiaste et optimiste.

Merci également à Carole Charbuillet pour tous nos échanges scientifiques et non scientifiques ainsi que pour son regard critique qui a permis d'enrichir mon travail tout au long de la thèse.

Enfin, je tiens à remercier Stéphane Pompidou. Merci beaucoup de tout ce que tu as fait pour moi. Merci de ta *disposition*, ta *dédication*, ta *rigurosité* et de t'être investi autant tout au long de la thèse et encore plus dans les moments les plus difficiles, je t'en serai toujours reconnaissant. Merci également pour toutes nos discussions et d'avoir toujours voulu partager la culture française avec moi.

Je souhaite remercier l'ensemble de mes collègues de l'Institut Arts et Métiers de Chambéry, de l'ENSAM de Bordeaux et de l'IUT de Bordeaux avec qui j'ai eu le plaisir de partager mon quotidien à différents moments de la thèse.

Je tiens à remercier vivement Mme Azita Ahmadi-Sénichault pour avoir suivi avec attention et bienveillance l'avancée de mes travaux de thèse.

Je remercie tout particulièrement Nathalie Garnier, Béatrice Desoudin et Roderick Braconneau pour l'aide, le support, le soutien et l'amitié qu'ils m'ont apportés tout au long de ces années.

Au cours de ma thèse, j'ai eu l'opportunité d'enseigner au sein des départements Génie Mécanique et Productique, Mesures Physiques et Génie Électrique et Informatique Industrielle de l'IUT de Bordeaux. Merci pour cette expérience professionnelle et personnelle partagée avec vous.

Je voudrais enfin remercier le réseau EcoSD. J'ai beaucoup appris lors des différents séminaires, des formations, des ateliers thématiques annuels et lors du projet de recherche collaboratif auquel j'ai eu l'opportunité de participer.

Merci à l'ensemble des mes collègues, doctorants pour la plupart, pour tous nos échanges et tous les bons moments. Merci Rachel, Enrico, Guilhem, Sasha, Soukaina, Ulises, Santiago, Ricardo, Charlotte et le reste de l'équipe de l'ENSAM.

Merci également à Ernesto, Cassiopée, Eileen, Paul, Tanguy, Florian et le reste de la bande des ouilles à l'IUT.

Merci Rémi, Louis, Sander, Negar, Coline, Hugo, Léa, Camille, Anne-Louise, Aurélien, Alexandra, Mahesh et tous mes anciens colocs de *home sweet home* qui sont pour moi ma grande famille bordelaise.

Je tiens à remercier également Daniel, Sandra, Fede et Nico dont l'amitié relativement récente a pris une place importante.

Un grand merci à Adeline pour m'avoir donné la force, les encouragements et les *coccole* qui m'ont permis de mener à bien ce projet lors de cette dernière ligne droite. Les mots ne sont pas suffisants pour exprimer toute la gratitude et l'amour que j'ai pour toi. Merci également à la famille Dubosc pour son hospitalité et pour m'avoir fait sentir comme à la maison.

Quiero agradecer a mi familia en México, a mis tíos, primos y sobrinos que nunca pierden la oportunidad de mostrarme su amor y cariño. También me gustaría dar las gracias a todos aquellos que ya no están con nosotros, pero que siguen presentes en mi corazón.

Finalmente quiero agradecer de manera muy especial a mis padres quienes a pesar de la distancia nunca han dejado de estar a mi lado. Yo no estaría aquí si no fuera por todo su amor y apoyo incondicional. Es por eso que este trabajo está dedicado a ustedes.

Table des matières

Table des matières

Table des matières	11
Nomenclature. Sigles et acronymes	21
Introduction générale	31
Chapitre 1 Conception, vie et fin de vie d'un produit	37
1. Introduction. Vers une économie circulaire	41
2. Le produit	42
2.1. Notion de produit	43
2.2. Valeur du produit	43
2.2.1. Estimer la valeur	43
2.2.2. La valeur ajoutée du produit	44
3. Le cycle de vie du produit.....	45
3.1. Définition du cycle de vie	45
3.2. Conception du produit	46
3.2.1. Vue d'ensemble du processus de développement	47
3.2.2. L'avant-projet	47
3.2.2.1. Identifier les défis du développement d'un produit.....	48
3.2.2.2. La structure organisationnelle.....	49
3.2.2.3. Planifier le développement	50
3.2.2.4. Finaliser l'avant-projet	51
3.2.2.5. Avant-projet. Synthèse.....	51
3.2.3. L'expression du besoin (définition du problème)	51
3.2.3.1. Identifier les besoins du client	52
3.2.3.2. Les spécifications du produit.....	54
3.2.3.3. La planification du projet	55

Table des matières

3.2.3.4. Le cahier des charges	56
3.2.3.5. Expression du besoin. Synthèse	56
3.2.4. La conception préliminaire	56
3.2.4.1. Développer des concepts	57
3.2.4.2. Définition préliminaire	60
3.2.4.3. Validation de la définition préliminaire	61
3.2.4.4. Bilan de la conception préliminaire	61
3.2.4.5. Conception préliminaire. Synthèse	61
3.2.5. La conception détaillée.....	61
3.2.5.1. Définition définitive	62
3.2.5.2. Prototypage <i>virtuel</i>	62
3.2.5.3. Plans et devis	63
3.2.5.4. Conception détaillée. Synthèse.....	63
3.2.6. Le prototypage	63
3.2.6.1. Réalisation du prototype.....	64
3.2.6.2. Essais et optimisation.....	64
3.2.6.3. Documentation	64
3.2.6.4. Le prototypage. Synthèse.....	65
3.2.7. L'industrialisation (Mise en production).....	65
3.2.7.1. Mise en œuvre du processus de fabrication	65
3.2.7.2. Revue de conception.....	65
3.2.7.3. Validation de la production en série	66
3.2.7.4. Les plans et devis officiels	66
3.2.7.5. Industrialisation. Synthèse	66
3.2.8. Cycle de développement du produit. Synthèse	68
3.3. Vie du produit	68
3.3.1. Extraction et transformation des matières premières, et production d'énergie	69
3.3.2. Fabrication.....	69
3.3.3. Distribution.....	69
3.3.4. Utilisation	70
3.3.5. Prolongement de la durée de vie	70
3.3.5.1. Maintenance préventive	70
3.3.5.2. Maintenance corrective	70
3.3.5.3. Mise à niveau.....	70
3.3.5.4. Réemploi.....	70
3.3.6. Fin d'utilisation et notion de déchet.....	70
3.3.6.1. Notion de déchet. Définition.....	71
3.3.6.2. Causes de la fin d'utilisation.....	71
3.4. Fin de vie du produit.....	72
3.4.1. Objectifs	72
3.4.2. La gestion de déchets	73
3.4.2.1. Sortie du statut de déchet.....	73
3.4.2.2. Hiérarchie de traitement des déchets.....	73

3.4.2.3. Les voies de valorisation des déchets.....	74
4. Conclusions	78
4.1. Cycle de vie du produit. Synthèse.....	78
4.2. Note sur la limite sémantique du terme <i>produit</i>. Notion d'artéfact.....	79
4.3. Amorce de la problématique.....	81
Chapitre 2 Contexte et problématique	83
1. Introduction	87
2. Transition d'une croissance basée sur le capitalisme à un modèle de développement durable.....	88
2.1. Économie. Notion d'économie circulaire	88
2.2. Logistique Les nouveaux modes de chaîne d'approvisionnement	89
2.2.1. D'une vision linéaire.....	89
2.2.2. ... à une vision bouclée	89
2.2.2.1. La logistique inverse.....	89
2.2.2.2. La chaîne d'approvisionnement en boucle fermée	90
2.2.2.3. La chaîne d'approvisionnement verte	90
2.2.2.4. La chaîne d'approvisionnement durable	90
2.2.3. Synthèse des modes de chaîne d'approvisionnement.....	90
2.2.4. Limites de nouveaux modes de chaîne d'approvisionnement.....	91
2.3. Législation Réglementations encadrant la gestion de déchets	91
2.3.1. Exigences législatives.....	91
2.3.2. Axes clés ciblés par la législation pour résoudre les problématiques de gestion des déchets.....	92
3. Mise en œuvre de la politique de gestion de déchets et d'économie circulaire	95
3.1. Premier axe de la politique de gestion des déchets : favoriser la valorisation des produits en fin de vie (déchets) par la mise en place des filières de traitement	95
3.1.1. Notion de filière.....	95
3.1.1.1. Définitions.....	95
3.1.1.2. Caractérisation d'une filière	97
3.1.2. Évaluer la performance de valorisation d'une filière de traitement	102
3.1.2.1. Notions de performance et performance de valorisation (d'une filière de traitement).....	102
3.1.2.2. Méthodes d'évaluation de la performance de valorisation d'une filière de traitement.....	104
3.1.2.3. État de lieux de la performance de filières REP en France	108
3.2. Second axe de la politique de gestion des déchets : prévenir la génération des déchets à partir d'une meilleure conception du produit en vue de son traitement en fin de vie	114
3.2.1. Conception pour <i>X</i>	114
3.2.1.1. <i>X</i> ?	114
3.2.1.2. Conception pour la fin de vie	115
3.2.1.3. Conception pour l'environnement : l'écoconception	115
3.2.2. Évaluer la performance potentielle de valorisation d'un produit en conception	118
3.2.2.1. Notion de valorisabilité d'un produit	118
3.2.2.2. Méthodes de référence pour l'évaluation de la valorisabilité d'un produit	119
3.2.2.3. Corrélation entre valorisabilité et valorisation. État des lieux.....	120
3.2.3. Évaluer les impacts environnementaux d'un produit	122
3.2.3.1. Notions d'impact environnemental et d'analyse du cycle de vie	122
3.2.3.2. Méthodes d'évaluation de référence des impacts du cycle de vie d'un produit	123

3.2.4. Développement d'outils de conception intégrant la notion de fin de vie.....	128
4. Synthèse.....	129
4.1. Problématique liée à l'évaluation en conception de la valorisabilité d'un produit	130
4.2. Problématique liée à l'aide à la décision en conception	131
4.3. Représentation synoptique de la problématiques de recherche	132
Chapitre 3 Hypothèses de solutions	133
1. Introduction	137
2. Évaluer la valorisabilité du produit lors de sa conception.....	138
2.1. État de l'art des méthodes d'évaluation de la valorisabilité d'un produit	138
2.1.1. Méthodes mono-dimension	138
2.1.1.1. Approche technique.....	138
2.1.1.2. Approche économique.....	139
2.1.1.3. Approche environnementale	139
2.1.2. Méthodes multi-dimensions.....	139
2.1.2.1. Méthodes à deux dimensions	139
2.1.2.2. Méthodes intégrant les trois dimensions.....	141
2.2. Synthèse et analyse de méthodes d'évaluation de la valorisabilité d'un produit	142
2.2.1. Synthèse des méthodes d'évaluation de la valorisabilité d'un produit	143
2.2.2. Comparaison des méthodes d'évaluation de la valorisabilité du produit.....	145
2.2.2.1. 1 ^{er} critère. Nature et nombre d'approche(s) considérée(s) par la méthode	145
2.2.2.2. 2 ^e critère. Type de méthode et d'approche selon le nombre d'indicateurs	146
2.2.2.3. 3 ^e critère. Prise en compte des critères massiques	147
2.2.3. Comparaison des indicateurs d'évaluation de la valorisabilité du produit	147
2.2.3.1. 1 ^e critère. Prépondérance des indicateurs massiques.....	147
2.2.3.2. 2 ^e critère d'analyse. Type d'indicateur (nature des résultats).....	148
2.2.3.3. 3 ^e critère. Approche de l'indicateur	149
2.2.3.4. 4 ^e critère. Scénario de fin de vie considéré	149
2.2.3.5. 5 ^e critère. Phase du cycle de vie visée	150
2.2.3.6. 6 ^e critère. Utilisateur visé.....	151
2.2.4. Conclusions. Classement des indicateurs	151
3. Aide à la décision en conception pour une meilleure prise en compte de la fin de vie d'un produit.	152
3.1. Leviers d'action et contraintes réglementaires associés à une démarche d'écoconception pour la fin de vie	154
3.1.1. Identification des leviers d'action associés à une démarche de conception pour la fin de vie	155
3.1.1.1. Conception pour la valorisation fonctionnelle	155
3.1.1.2. Conception pour la valorisation matière	157
3.1.1.3. Conception pour la valorisation énergétique	161
3.1.1.4. Conception pour l'élimination.....	163
3.1.2. Identification des seuls leviers d'action environnementaux.....	164
3.1.3. Contraintes réglementaires	165
3.1.4. Synthèse de leviers d'action et contraintes réglementaires identifiés	166
3.2. Adéquation d'indicateurs de valorisabilité aux besoins d'analyse en conception	167
4. Hypothèses de solution.....	169
Chapitre 4 Méthodologie d'évaluation et d'aide à la décision en conception.....	173

1. Introduction. Pilotage de la circularité par les acteurs de la conception et de la fin de vie	177
2. Design for EoL. Développement d'un outil d'aide à la décision en conception piloté par l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit et l'outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie	178
2.1. Description de la démarche	178
2.2. Étape 1. Évaluation de la valorisabilité en fin de vie du produit en cours de conception.....	179
2.2.1. Description de la méthode d'évaluation de la valorisabilité.....	179
2.2.2. Indicateur et indice. Rappel sémantique	180
2.2.3. Construction de l'indice de valorisabilité.....	180
2.2.4. Sélection des indicateurs de valorisabilité.....	180
2.2.4.1. Évaluation de la performance technique du traitement du produit	180
2.2.4.2. Évaluation de la pertinence économique du traitement du produit.....	186
2.2.4.3. Évaluation de la pertinence environnementale du traitement du produit.....	189
2.2.5. Sélection de la méthode de pondération des indicateurs	192
2.2.6. Sélection de la méthode d'agrégation des indicateurs.....	193
2.2.7. Proposition d'indice de valorisabilité d'un produit.....	195
2.3. Étape 2. Aide à la décision en conception.....	196
2.3.1. Description de la méthode d'aide à la décision en conception	196
2.3.2. Outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie	197
2.3.2.1. Description de la démarche d'outillage.....	197
2.3.2.2. Définition d'indicateurs associés aux leviers d'action de choix de conception et mise en correspondance avec les lignes directrices	197
2.3.2.3. Définition d'indicateurs associés aux leviers d'action de transmission d'informations et mise en correspondance avec les lignes directrices	229
2.4. Étape 3. Réconception du produit	231
3. Design from EoL. Développement d'un outil d'aide à la décision en conception piloté par l'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée	232
3.1. Description de la méthode d'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée	232
3.2. Construction de l'indice de viabilité d'utilisation de la matière recyclée	233
3.2.1. Sélection des indicateurs d'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée	233
3.2.1.1. Évaluation de la pertinence technique de l'utilisation de la matière recyclée	233
3.2.1.2. Évaluation de la pertinence économique de l'utilisation de la matière recyclée	234
3.2.1.3. Évaluation de la pertinence environnementale de l'utilisation de la matière recyclée.....	234
3.2.2. Sélection de la méthode de pondération	235
3.2.3. Sélection de la méthode d'agrégation	235
4. Synthèse.....	236
Chapitre 5 Cas d'étude	237
1. Introduction	241
2. Caractérisation du produit considéré	242
3. Description de la filière de traitement en fin de vie du Fairphone 2®	243
3.1. Cadre réglementaire des DEEE	244
3.2. Organisation de la filière des DEEE	245
3.2.1. Classement des EEE	245
3.2.2. Organisation de la filière	246
3.2.2.1. Les éco-organismes.....	246
3.2.2.2. Organisations des flux physiques	246
4. Validation de la proposition de méthode d'évaluation de la valorisabilité du produit comme outil d'aide à la décision en conception	

.....	247
4.1. Description des scénarios de fin de vie	247
4.1.1. Scénario 1 Récupération de matière par fusion du Fairphone 2®	247
4.1.2. Scénario 2 Démantèlement et récupération sélective par fusion.....	248
4.1.3. Scénario 3 Broyage, prétraitement physique et métallurgie	248
4.1.4. Scénario 4 Dépollution du Fairphone 2® et récupération de matière par fusion.....	249
4.1.5. Scénario 5 Filière DEEE française.....	251
4.2. Sélection des scénarios de fin de vie à modéliser.....	252
4.3. Évaluation conventionnelle de la valorisabilité.....	252
4.4. Évaluation multidimensionnelle de la valorisabilité.....	253
4.4.1. Évaluation de la performance technique du traitement.....	253
4.4.2. Évaluation de la pertinence économique du traitement	254
4.4.3. Évaluation de la pertinence environnementale du traitement.....	255
4.4.4. Évaluation de l'indice de valorisabilité du produit (agrégation des trois dimensions).....	256
4.5. Analyse des résultats	256
5. Validation de l'outillage des lignes directrices d'écoconception comme outil d'aide à la décision en conception	258
5.1. Évaluation de la performance du produit vis-à-vis d'une valorisation fonctionnelle	258
5.1.1. Démontabilité du produit	258
5.1.1.1. Accessibilité aux composants.....	259
5.1.1.2. Accessibilité aux fixations.....	259
5.1.1.3. Complexité du produit	260
5.1.1.4. Complexité du système de câblage	261
5.1.1.5. Complexité du système de fixations.....	261
5.1.1.6. Démontabilité des composants.....	261
5.1.1.7. Démontabilité des fixations	262
5.1.1.8. Diversité des fixations	262
5.1.1.9. Diversité d'outils de (dé)montage.....	263
5.1.1.10. Durabilité des fixations	263
5.1.1.11. Modularité du produit.....	263
5.1.1.12. Repérabilité des composants	264
5.1.1.13. Repérabilité des fixations.....	265
5.1.1.14. Standardisation d'outils de (dé)montage.....	265
5.1.1.15. Synthèse des résultats et conclusions sur la démontabilité du Fairphone 2® et de ses composants.....	266
5.1.2. Remontabilité du produit	267
5.1.2.1. Remontabilité des composants.....	267
5.1.2.2. Remontabilité des fixations.....	268
5.1.2.3. Synthèse des résultats et conclusions sur la remontabilité du Fairphone 2® et de ses composants.....	268
5.1.3. Capacité à monter en gamme du produit.....	269
5.1.4. Réaffectabilité du produit.....	270
5.1.5. Réutilisabilité du produit	270
5.1.6. Standardisation des composants.....	271
5.2. Évaluation de la performance du produit vis-à-vis de la valorisation matière.....	271
5.2.1. Circularité des matériaux.....	272
5.2.2. Démontabilité du produit.....	273

5.2.3. Recyclabilité du produit.....	273
5.2.3.1. Compatibilité des matériaux.....	273
5.2.3.2. Diversité des matériaux.....	276
5.2.3.3. Recyclabilité des matériaux.....	276
5.2.3.4. Synthèse des résultats et conclusions sur la recyclabilité du Fairphone 2® et de ses composants.....	278
5.2.4. Toxicité des matériaux.....	278
5.2.5. Utilisation des matières recyclées.....	279
5.3. Analyse des résultats.....	280
5.3.1. Performance du Fairphone 2® vis-à-vis de sa valorisation fonctionnelle.....	280
5.3.2. Performance du Fairphone 2® vis-à-vis de sa valorisabilité matière.....	281
5.3.3. Bilan.....	282
6. Validation de la proposition de méthode d'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée comme outil d'aide à la décision en conception.....	283
6.1. Évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée.....	283
6.1.1. Évaluation de la pertinence technique de l'utilisation.....	283
6.1.2. Évaluation de la pertinence économique de l'utilisation.....	283
6.1.3. Évaluation de la pertinence environnementale de l'utilisation.....	284
6.1.4. Évaluation de l'indice de viabilité d'utilisation de la matière recyclée (agrégation des trois dimensions).....	285
6.2. Analyse des résultats.....	285
Conclusions et perspectives.....	287
1. Apports scientifiques et limites de la proposition.....	289
1.1. Conception pour la fin de vie.....	289
1.1.1. Évaluation de la valorisabilité du produit.....	290
1.1.2. Aide à la décision en conception.....	291
1.2. Conception depuis la fin de vie.....	292
2. Perspectives.....	293
2.1. Outil de conception pour la fin de vie.....	293
2.2. Outil de conception depuis la fin de vie.....	294
Annexe 1 Glossaire.....	297
Annexe 2 Nomenclature du Fairphone 2®.....	307
Références bibliographiques.....	311

Nomenclature. Sigles et acronymes

Nomenclature

Alphabet latin

a_c^i	: accessibilité au $i^{\text{ème}}$ composant
A_c	: accessibilité aux composants
a_f	: accessibilité à la fixation
a_f^i	: accessibilité à la $i^{\text{ème}}$ fixation
A_f	: accessibilité aux fixations
B_m	: biodégradabilité du matériau
ci_m^i	: circularité du $i^{\text{ème}}$ matériau
Ci_m	: circularité des matériaux
c_i	: concentration du $i^{\text{ème}}$ matériau
c_m	: compatibilité entre matériaux
$c_m^{i,j}$: compatibilité entre le $i^{\text{ème}}$ et le $j^{\text{ème}}$ matériau
C_m^i	: compatibilité du $i^{\text{ème}}$ matériau
C_m	: compatibilité des matériaux
CMU	: circular material use rate (<i>taux d'utilisation de matériau circulaire</i>)
Cn	: communication des informations
Co_p	: complexité du produit

Nomenclature

Co_{sc}	: complexité du système de câblage
Co_{sf}	: complexité du système de fixation
D_m	: diversité des matériaux
de_c	: démontabilité du composant
de_c^i	: démontabilité du $i^{ème}$ composant
De_c	: démontabilité de l'ensemble des composants
de_f	: démontabilité de la fixation
de_f^i	: démontabilité de la $i^{ème}$ fixation
De_f	: démontabilité de l'ensemble des fixations
De_p	: démontabilité du produit
Di_f	: diversité des fixations
Di_{to}	: diversité d'outils de (dé)montage
du_f	: durabilité de la fixation
du_f^i	: durabilité de la $i^{ème}$ fixation
Du_f	: durabilité de l'ensemble des fixations
$EOL-RIR$: end-of-life recycling input rates (<i>taux d'intrants du recyclage en fin de vie</i>)
g_i	: $i^{ème}$ grandeur physique mesurée
$g_{i,ref}$: $i^{ème}$ grandeur de référence
$h(x_i)$: transformation du $i^{ème}$ indicateur à agréger
I_g	: indice globale
Id_c	: identification du composant
In_c	: inflammabilité du composant
k_{cp}	: coefficient de complexité du produit
k_{csc}	: coefficient de complexité du système de câblage
k_{csf}	: coefficient de complexité du système fixation
m	: nombre d'artéfacts du produit
	: nombre d'artéfacts du produit conceptuellement réutilisables
	: nombre d'artéfacts du produit conceptuellement réaffectables
	: nombre d'artéfacts du produit pouvant conceptuellement monter en gamme
	: nombre de composants du produit
m_{am}	: masse d'autres matériaux dans la fraction recyclée
m_{amgc}^i	: masse du $i^{ème}$ artéfact pouvant conceptuellement monter en gamme

m_{arac}^i	: masse du $i^{ème}$ artéfact conceptuellement réaffectable
m_{aruc}^i	: masse du $i^{ème}$ artéfact conceptuellement réutilisable
m_c^i	: masse du $i^{ème}$ artéfact
MCI	: material circularity indicator (<i>indicateur de circularité des matériaux</i>)
m_{cr}	: masse de matière recyclée contenue dans le produit
m_D	: masse des matériaux enlevés lors de la phase de démontage
m_{EEE}	: masse totale de l'EEE
m_i	: masse du $i^{ème}$ composant
m_m	: masse du matériau considéré dans la fraction recyclée
m_M	: masse des métaux triés lors de la phase de tri
m_{mr}^i	: masse de matière recyclée contenue dans le $i^{ème}$ artéfact
m_p	: masse totale du produit
m_p	: masse des matériaux enlevés lors du prétraitement
M_p	: modularité du produit
m_{pmgc}	: masse du produit conceptuellement montable en gamme
m_{prac}	: masse du produit conceptuellement réaffectable
m_{pruc}	: masse du produit conceptuellement réutilisable
m_{rf}	: masse du matériau recyclée par la filière
m_{rppmp}	: masse du matériau issue du recyclage entrant dans la production de matières premières
m_{Te}	: masse des résidus non-métalliques valorisables énergétiquement
m_{yf}	: masse du matériau traitée par la filière
m_{TR}	: masse des résidus non-métalliques recyclables
m_{tpmp}	: masse totale du matériau entrant dans la production de matières premières
m_v	: masse potentiellement valorisable fonctionnellement/en matière/énergétiquement
m_v	: masse totale du véhicule
m_{ve}^i	: masse du $i^{ème}$ artéfact potentiellement valorisable énergétiquement
m_{vf}^i	: masse du $i^{ème}$ artéfact potentiellement valorisable fonctionnellement
m_{vm}^i	: masse du $i^{ème}$ artéfact potentiellement valorisable en matière
n	: nombre de voies de traitement en valorisation énergétique
	: nombre de voies de traitement en valorisation fonctionnelle
	: nombre de voies de traitement en valorisation matière

Nomenclature

	: nombre de voies de traitement en valorisation fonctionnelle/matière/énergétique
	: nombre d'indicateurs agrégés (Maurin 2007)
n_{cc}	: nombre de câbles de connexion
n_{fp}	: nombre de fonctions du produit
n_i	: nombre d'indicateurs de valorisabilité à agréger
n_m	: nombre de modules
n_{tf}	: nombre de types des fixations
n_{to}	: nombre de types d'outils de (dé)montage nécessaires
s	: nombre de catégories d'impacts
u	: nombre de matériaux
v	: nombre de fixations
$p_{ec}^{i,j}$: pertinence économique du traitement du $i^{ème}$ artéfact dans la $j^{ème}$ voie de traitement
p_{ecu}	: pertinence économique de l'utilisation de la matière recyclée
$p_{en}^{i,j}$: pertinence environnementale du traitement du $i^{ème}$ artéfact dans la $j^{ème}$ voie de traitement
p_{enu}	: pertinence environnementale de l'utilisation de la matière recyclée
$p_{te}^{i,j}$: performance technique du traitement du $i^{ème}$ artéfact dans la $j^{ème}$ voie de traitement
p_{teu}	: pertinence technique de l'utilisation de la matière recyclée
Pc_m	: pouvoir calorifique du matériau
Pm_m	: potentiel méthanogène du matériau
R_{cov}	: taux de valorisabilité
R_m^i	: recyclabilité du $i^{ème}$ matériau
R_m	: recyclabilité des matériaux
R_p	: recyclabilité du produit
Ra_m	: rareté (criticité) du matériau
rp_c	: repérabilité du composant
rp_c^i	: repérabilité du $i^{ème}$ composant
Rp_c	: repérabilité des composants
rp_f	: repérabilité de la fixation
rp_f^i	: repérabilité de la $i^{ème}$ fixation
Rp_f	: repérabilité des fixations
RVR_i	: taux de valorisation du $i^{ème}$ composant dans le scénario de fin de vie correspondant
S_c	: standardisation des composants

S_{am}	: sûreté d'approvisionnement du matériau (recyclé)
S_t	: score de temps de démontage
S_f^i	: standardisation de la $i^{\text{ème}}$ fixation
S_f	: standardisation des fixations
to	: toxicité du matériau ou de la substance
to_f^i	: toxicité du $i^{\text{ème}}$ matériau ou de la $i^{\text{ème}}$ substance
To_f	: toxicité des matériaux ou des substances
V_a^i	: indice de valorisabilité du $i^{\text{ème}}$ artéfact
$v_a^{i,l}$: $l^{\text{ème}}$ indicateur de valorisabilité à agréger du $i^{\text{ème}}$ artéfact
v_{ec}	: valeur économique matériau
$v_{ec}^{i,j}$: valeur économique du $i^{\text{ème}}$ artéfact issu de la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement
$v_{ec.ref}$: valeur économique de référence du matériau
$v_{ec.ref}^i$: valeur économique de référence du $i^{\text{ème}}$ artéfact
$v_{en}^{i,j,k}$: valeur environnementale du $i^{\text{ème}}$ artéfact issu de la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement dans la $k^{\text{ème}}$ catégorie d'impact
$v_{en.ref}^{i,k}$: valeur environnementale de référence du $i^{\text{ème}}$ artéfact dans la $k^{\text{ème}}$ catégorie d'impact
Vu	: viabilité d'utilisation de la matière recyclée
x_i	: $i^{\text{ème}}$ indicateur à agréger
x_u	: valeur commune de référence

Alphabet grec

$\mathcal{E}_v^{i,j}$: efficacité potentielle de la valorisation fonctionnelle/matière/énergétique du $i^{\text{ème}}$ artéfact dans la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement
\mathcal{E}_{ve}^i	: efficacité potentielle de la valorisation énergétique du $i^{\text{ème}}$ artéfact
\mathcal{E}_{vf}^i	: efficacité potentielle de la valorisation fonctionnelle du $i^{\text{ème}}$ artéfact
\mathcal{E}_{vm}^i	: efficacité potentielle de la valorisation matière du $i^{\text{ème}}$ artéfact
τ_{cr}	: taux de contenu recyclé
τ'_{mgc}	: taux de capacité conceptuelle à monter en gamme
τ_p	: taux de pureté du matériau

Nomenclature

$\tau_p^{i,j}$: taux de pureté du $i^{\text{ème}}$ artéfact dans la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement de la valorisation matière
τ_r	: taux de recyclage du matériau
τ'_{rac}	: taux de réaffectabilité conceptuelle
τ'_{ruc}	: taux de réutilisabilité conceptuelle
τ'_v	: taux de valorisabilité fonctionnelle/matière/énergétique
$\tau_v^{i,j}$: taux de valorisation fonctionnelle/matière/énergétique du $i^{\text{ème}}$ artéfact dans la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement
$\tau_{ve}^{i,j}$: taux de valorisation du $i^{\text{ème}}$ artéfact dans la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement de la valorisation énergétique
$\tau_{vf}^{i,j}$: taux de valorisation du $i^{\text{ème}}$ artéfact dans la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement de la valorisation fonctionnelle
$\tau_{vm}^{i,j}$: taux de valorisation du $i^{\text{ème}}$ artéfact dans la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement de la valorisation matière

Sigles et acronymes

ACV	: analyse de cycle de vie
ADEME	: agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
ADP	: abiotic depletion potential (<i>potentiel d'appauvrissement abiotique des éléments</i>)
AE	: accumulated exceedance (<i>dépassement accumulé</i>)
APD	: avant-projet définitif
APS	: avant-projet sommaire
BdD	: base de données
CdC	: cahier des charges
CML	: centrum voor milieukunde Leiden (<i>centre des sciences de l'environnement de Leiden</i>)
CSR	: combustibles solides de récupération
DASRI	: déchets d'activités de soins à risques infectieux
DDS	: déchets diffus spécifiques
DEA	: déchets d'éléments d'ameublement
DEEE	: déchets d'équipements électriques et électroniques
DfX	: design for x (<i>conception pour x</i>)
DIB	: déchets industriels banals
EEE	: équipements électriques et électroniques
EF LCIA	: environmental footprint life cycle impact assessment (<i>évaluation de l'impact du cycle de vie de l'empreinte environnementale</i>)
EIC	: emballages industriels et commerciaux
EM	: emballages ménagers
EoL	: end-of-life (<i>fin de vie</i>)
ETP	: ecotoxicity potential (<i>potentiel d'écotoxicité</i>)
FdV	: fin de vie

FFGF	: fluides frigorigènes et gaz fluorés
GWP	: global warming potential (<i>potentiel de réchauffement climatique</i>)
HTP	: human toxicity potential (<i>potentiel de toxicité humaine</i>)
HU	: huiles usagées
IEC	: international electrotechnical commission (<i>commission électrotechnique internationale</i>)
ILCD	: international reference life cycle data system (<i>système de référence international des données du cycle de vie</i>)
IRP	: ionizing radiation potential (<i>potentiel de rayonnement ionisant</i>)
ISO	: international organization for standardization (<i>organisation internationale de normalisation</i>)
JRC	: joint research center (<i>centre commun de recherche</i>)
KPI	: key performance indicator
MNU	: médicaments non utilisés
OCDE	: organisation de coopération et de développement économiques
ODP	: ozone depletion potential (<i>potentiel de déplétion d'ozone</i>)
PA	: piles et accumulateurs
PAM	: petits appareils en mélange
PCI	: pouvoir calorifique inférieur
PCOP	: photochemical ozone creation potential (<i>potentiel de création d'ozone photochimique</i>)
PCS	: pouvoir calorifique supérieur
PGA	: papiers graphiques ménagers et assimilés
PU	: pneumatiques usagés
REP	: responsabilité élargie du producteur
RFB	: retardateurs de flammes bromés
TLC	: textiles, habillement, linge de maison et chaussures
TR	: technical report (<i>rapport technique</i>)
VHU	: véhicule hors d'usage

Introduction générale

Introduction générale

Depuis le début des années 1970, une législation de plus en plus exigeante a été mise en place pour valoriser les déchets dans une démarche conjointe d'économie circulaire et de protection de l'environnement. L'un des concepts clés est celui de la responsabilité élargie du producteur (REP) ; son principe est que le fabricant d'un produit en est responsable tout au long de son cycle de vie, et notamment lorsqu'il arrive en fin de vie et devient un déchet (OCDE 2017).

Les réglementations incitent par ailleurs les concepteurs et les fabricants à s'engager dans des démarches d'économie circulaire et d'écoconception en vue d'atténuer l'impact de leurs produits sur l'environnement. Cette approche s'appuie en particulier sur l'évaluation, dès la phase de conception, de la capacité du produit arrivé en fin de vie à intégrer une filière de traitement. Le concepteur évalue essentiellement aujourd'hui cette qualité au travers des taux de recyclabilité et de valorisabilité de ses produits (voir norme ISO 22628 pour le secteur automobile (ISO 2002), et rapport technique IEC/TR 62635 pour les équipements électriques et électroniques (IEC 2012)). Son rôle s'exerçant dans les premières phases du cycle de vie du produit (par essence découplées temporellement de sa fin de vie), le concepteur a des connaissances très limitées sur le fonctionnement et la performance réels des filières. Il est donc nécessaire de lui fournir des informations réalistes et actualisées sur la façon dont son produit pourrait être mieux valorisé, pour prendre en compte dès lors toute contrainte nouvelle dans le cahier des charges et être ainsi aidé dans ses choix de conception.

Notre travail vise ainsi à établir une synergie entre l'équipe de conception du produit et les acteurs de la filière pour simplifier la prise de décision en conception. Les problématiques sont alors les suivantes :

- quels éléments prendre en compte en conception pour évaluer d'une part la valorisabilité du produit, et d'autre part la pertinence de la valorisation envisagée sur les plans économique et environnemental ?
- comment communiquer efficacement au concepteur les résultats de cette évaluation pour faciliter et améliorer sa prise de décision ?

Les choix de conception sont aujourd'hui essentiellement pilotés par l'évaluation de la valorisabilité du produit. Les lignes directrices associées aux démarches de conception pour X sont ensuite utilisées comme outil d'aide à la décision pour la recherche de solutions. L'inventaire de ces guides couplé à une démarche d'écoconception pour la fin de vie permet d'identifier les leviers d'action associés.

Un lien entre (i) la valorisabilité évaluée dès lors et (ii) les lignes directrices d'écoconception, doit donc être établi pour que le concepteur puisse mieux interpréter les informations auxquelles il est confronté, et simplifier d'autant son processus de conception. Dans ce cadre, il peut n'y avoir qu'une faible adéquation entre les indicateurs de valorisabilité et les leviers d'action associés aux lignes directrices. Pour répondre à cette problématique, la proposition vise à construire un environnement d'aide à la décision en conception, basé sur l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit, complété par un guide outillé tiré des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie. L'approche proposée est enfin validée sur l'étude de l'intégration d'un Fairphone® en fin de vie dans la filière des DEEE.

Le manuscrit de thèse s'organise en cinq chapitres.

Chapitre 1. Conception, vie et fin de vie d'un produit Le premier chapitre a une forte connotation lexicale car il cherche à définir un cadre théorique exhaustif permettant de mieux comprendre le cycle de vie d'un produit dans ses trois grandes phases : conception, vie et fin de vie.

Chapitre 2. Contexte et problématique Le deuxième chapitre présente un état de lieux de la mise en œuvre des politiques de gestion de déchets et d'économie circulaire selon les deux axes abordés par la législation :

- la mise en place des filières de traitement pour favoriser la valorisation des produits en fin de vie ;
- la prévention de la génération des déchets à partir d'une meilleure conception du produit vis-à-vis de son traitement en fin de vie.

Les manques et les besoins listés dans cette analyse permettent d'identifier les problématiques de recherche en fin de chapitre.

Chapitre 3. Hypothèses de solutions La problématique de recherche identifiée préalablement est analysée en profondeur pour proposer des hypothèses de solution permettant d'y répondre. L'analyse est menée en deux temps :

- l'identification de méthodes et d'indicateurs d'évaluation de la valorisabilité d'un produit ;
- l'identification des leviers d'action (issus des lignes directrices de conception) mis à la disposition du concepteur pour améliorer son produit et son adéquation avec les indicateurs d'évaluation de la valorisabilité.

Les hypothèses de solutions sont formulées en fin de chapitre.

Chapitre 4. Méthodologie d'évaluation et d'aide à la décision en conception Dans ce chapitre, deux propositions d'outil d'évaluation et d'aide à la décision en conception sont développés :

- le premier outil cherche (i) à évaluer la capacité d'un produit à être valorisé par la filière lors qu'il sera en fin de vie, et la pertinence économique et environnementale du traitement, (ii) à identifier les composants les moins valorisables et (iii) à proposer les stratégies d'amélioration les plus adaptées ;
- le deuxième outil s'intéresse à valider la viabilité d'utilisation de la matière recyclée sur les plans technique, économique et environnemental.

Chapitre 5 : Cas d'étude Les outils d'aide à la décision en conception proposés dans le chapitre précédent sont testés et validés dans ce chapitre. La validation est menée en deux étapes :

- la comparaison de trois scénarios de traitement en fin de vie est utilisée pour valider la proposition de méthode d'évaluation multidimensionnelle de la valorisabilité du produit ;
- l'outillage des lignes directrices d'écoconception comme outil d'aide à la décision en conception est validé à partir de l'évaluation du Fairphone 2®.

Conclusions et perspectives L'apport scientifique et les limites de la proposition sont analysés et des voies d'ouverture sont proposées.

Cette thèse a été menée au sein de l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M) et de l'Institut Arts et Métiers de Chambéry. Elle a été cofinancée par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) et l'Institut Carnot ARTS.

Chapitre 1

Conception, vie et fin de vie d'un produit

Résumé Ce travail de recherche vise à prendre en compte et à faciliter l'intégration d'un produit en fin de vie dans sa filière de traitement, dès sa conception-même. Il est donc important de définir en premier lieu ce que nous entendons par *produit*, le domaine couvert par l'étude des impacts liés à sa fabrication, son utilisation et plus particulièrement sa fin de vie, et donc naturellement ce qu'est le *cycle de vie du produit*. Dans ce chapitre à forte connotation lexicale, les premières hypothèses d'étude sont présentées.

Ce travail s'intégrant dans le champ de l'économie circulaire, la notion de *valeur* du produit sera abordée dans une première partie. Le cycle de vie sera ensuite largement détaillé au travers de ses trois grandes phases : sa conception, sa vie et sa fin de vie. Ainsi, les différentes étapes du processus de conception permettant de passer d'une idée ou d'un besoin au produit final, dont un prototype a été testé et validé pour une mise en production, sont détaillées dans un premier temps. Les étapes de vie du produit (qui s'étendent de l'extraction et la transformation des matières premières à la fin de son utilisation) sont ensuite présentées. Enfin, la fin de vie du produit est décrite en insistant sur la notion de déchet et ses différents modes de gestion. Les nuances existant entre les notions de *voie de valorisation*, *voie de traitement* et *scénario de fin de vie* sont aussi détaillées.

Ce chapitre faisant émerger certaines limites sémantiques associées au terme *produit*, l'utilisation du mot *artéfact* est proposée pour mieux appréhender les analyses développées ultérieurement. Une amorce sur la problématique de recherche est enfin présentée en fin de chapitre.

Table des matières du Chapitre 1

1. Introduction. Vers une économie circulaire	41
2. Le produit	42
2.1. Notion de produit	43
2.2. Valeur du produit	43
2.2.1. Estimer la valeur	43
2.2.2. La valeur ajoutée du produit	44
3. Le cycle de vie du produit.....	45
3.1. Définition du cycle de vie	45
3.2. Conception du produit	46
3.2.1. Vue d'ensemble du processus de développement	47
3.2.2. L'avant-projet	47
3.2.2.1. Identifier les défis du développement d'un produit.....	48
3.2.2.2. La structure organisationnelle.....	49
3.2.2.3. Planifier le développement	50
3.2.2.4. Finaliser l'avant-projet	51
3.2.2.5. Avant-projet. Synthèse.....	51
3.2.3. L'expression du besoin (définition du problème)	51
3.2.3.1. Identifier les besoins du client	52
3.2.3.2. Les spécifications du produit.....	54
3.2.3.3. La planification du projet	55
3.2.3.4. Le cahier des charges	56
3.2.3.5. Expression du besoin. Synthèse	56
3.2.4. La conception préliminaire	56
3.2.4.1. Développer des concepts	57
3.2.4.2. Définition préliminaire	60
3.2.4.3. Validation de la définition préliminaire.....	61
3.2.4.4. Bilan de la conception préliminaire.....	61
3.2.4.5. Conception préliminaire. Synthèse	61
3.2.5. La conception détaillée.....	61
3.2.5.1. Définition définitive	62
3.2.5.2. Prototypage <i>virtuel</i>	62
3.2.5.3. Plans et devis	63
3.2.5.4. Conception détaillée. Synthèse.....	63
3.2.6. Le prototypage	63
3.2.6.1. Réalisation du prototype.....	64
3.2.6.2. Essais et optimisation.....	64
3.2.6.3. Documentation	64
3.2.6.4. Le prototypage. Synthèse.....	65
3.2.7. L'industrialisation (Mise en production).....	65
3.2.7.1. Mise en œuvre du processus de fabrication	65

Chapitre 1

Conception, vie et fin de vie d'un produit

3.2.7.2. Revue de conception.....	65
3.2.7.3. Validation de la production en série	66
3.2.7.4. Les plans et devis officiels	66
3.2.7.5. Industrialisation. Synthèse	66
3.2.8. Cycle de développement du produit. Synthèse	68
3.3. Vie du produit	68
3.3.1. Extraction et transformation des matières premières, et production d'énergie	69
3.3.2. Fabrication.....	69
3.3.3. Distribution.....	69
3.3.4. Utilisation	70
3.3.5. Prolongement de la durée de vie	70
3.3.5.1. Maintenance préventive	70
3.3.5.2. Maintenance corrective	70
3.3.5.3. Mise à niveau	70
3.3.5.4. Réemploi	70
3.3.6. Fin d'utilisation et notion de déchet.....	70
3.3.6.1. Notion de déchet. Définition.....	71
3.3.6.2. Causes de la fin d'utilisation.....	71
3.4. Fin de vie du produit.....	72
3.4.1. Objectifs	72
3.4.2. La gestion de déchets	73
3.4.2.1. Sortie du statut de déchet.....	73
3.4.2.2. Hiérarchie de traitement des déchets.....	73
3.4.2.3. Les voies de valorisation des déchets.....	74
4. Conclusions	78
4.1. Cycle de vie du produit. Synthèse.....	78
4.2. Note sur la limite sémantique du terme <i>produit</i>. Notion d'artéfact.....	79
4.3. Amorce de la problématique.....	81

Conception, vie et fin de vie d'un produit

1. Introduction.

Vers une économie circulaire

L'*économie circulaire* est un modèle économique visant à décorrélérer le développement économique mondial (à fort dominante capitaliste) de la consommation des ressources limitées, tout en assurant la réduction des impacts environnementaux (ADEME 2014a; Ellen MacArthur Foundation 2016).

Ce modèle vise d'une part à conserver la valeur des produits, des matières et des ressources aussi longtemps que possible, et à réduire d'autre part la production de déchets (Commission Européenne 2015). C'est donc une économie restauratrice et régénératrice par nature, qui cherche à maintenir au mieux les produits, composants et matériaux à leurs niveaux d'utilité et de valeur optimaux. L'économie circulaire privilégie également l'utilisation d'énergies renouvelables, vise à éliminer les produits chimiques toxiques en favorisant une meilleure conception des produits, des matériaux, des systèmes, et plus généralement innove en matière de modèles d'affaires. (Ellen MacArthur Foundation 2016)

Il existe d'autres définitions et interprétations du concept d'économie circulaire centrées sur les ressources. Elles soulignent toutes la nécessité de créer des flux fermés de matière, et de réduire la consommation de ressources vierges et les impacts environnementaux nuisibles qui en découlent. (Rizos, Tuokko, et Behrens 2017)

Les objectifs et leviers de l'économie circulaire sont :

- la régénération, qui consiste à
 - récupérer, conserver et rétablir des écosystèmes sains ;
 - restituer les ressources biologiques issues de la biosphère ;
- le partage, autrement dit
 - partager les actifs (p. ex. véhicules, appartements, équipements électroniques, etc.) ;
 - réutiliser, favoriser l'achat de produits et objets d'occasion ;

Chapitre 1

Conception, vie et fin de vie d'un produit

- prolonger la durée de vie des produits par une conception assurant leur durabilité ou leur évolutivité, leur maintenance (préventive ou curative), etc. ;
- l'optimisation dans le but
 - d'améliorer la performance du produit ;
 - d'éliminer les déchets dans la production et la chaîne logistique ;
 - d'exploiter les grandes bases de données, l'automatisation et les commandes à distances ;
- la valorisation des déchets pour
 - reconditionner les produits ou les composants ;
 - recycler les matériaux ;
 - méthaniser les déchets organiques ;
 - extraire des produits biochimiques à partir des déchets organiques ;
- la dématérialisation
 - directe (p. ex. livres, CD, DVD, etc.) ;
 - ou indirecte (p. ex. achats en ligne) ;
- l'échange afin de
 - favoriser les énergies et les ressources renouvelables ;
 - utiliser les nouvelles technologies (p. ex. impression 3D) ;
 - sélectionner les produits nouveaux qui seront utilisés dans une logique de service (p. ex. transports multimodaux).

(Ellen MacArthur Foundation 2016)

Pour son essor, l'économie circulaire doit utiliser des leviers techniques, économiques et sociaux tout au long du cycle de vie du produit, de sa conception à sa fin de vie.

Ce chapitre cherche à définir un cadre théorique exhaustif permettant de mieux comprendre ce *cycle de vie* ainsi que les liens et opportunités de chacune de ces phases. La notion d'économie circulaire est ainsi étudiée en gardant le produit au cœur de cette analyse. À cette fin, les notions de produit et de valeur sont abordées dans un premier temps, puis le cycle de développement du produit est défini en s'appuyant sur ses trois grandes phases : sa conception, sa vie et sa fin de vie. Une amorce de problématique est présentée en fin de chapitre.

2. Le produit

Le *produit* est au cœur de tout système économique. Comme dans d'autres modèles, l'objectif est non seulement la production de valeur, mais aussi sa préservation. Les leviers permettant de soutenir le modèle de l'*économie circulaire* apparaissent ainsi

- en fin de vie (c.-à-d. lorsqu'il est assimilé à un déchet) et qu'il peut encore être valorisé ;
- tout au long de sa vie, en prolongeant sa durée de vie pour qu'il continue à être fonctionnel ;
- mais aussi dès sa conception, si sa structure est optimisée pour l'adapter au mieux à sa filière de traitement en fin de vie.

Il semble donc judicieux de bien définir en premier lieu ce que nous entendons par *produit*, et ainsi que la notion de *valeur* que l'on cherche à augmenter ou à préserver dans tout système économique.

2.1. Notion de produit

Par définition, le terme *produit* désigne tout bien ou service résultant d'une activité humaine (ISO 2006a). On en distingue quatre catégories :

- les services (p. ex. le transport) ;
- les logiciels ;
- les produits matériels (p. ex. une pièce mécanique) ;
- ou toute matière issue d'un processus quelconque.

Notre étude se focalise toutefois seulement sur les produits *physiques*, c'est-à-dire ceux appartenant aux deux dernières catégories.

2.2. Valeur du produit

Puisque la notion de *valorisation* du produit en fin de vie doit être abordée ultérieurement (voir § 3.3.6), il semble naturel d'évoquer en premier lieu celle de *valeur* du produit ou de ses composants.

2.2.1. Estimer la valeur

La norme Afnor portant sur le vocabulaire de *l'Analyse de la valeur* définit la *valeur* comme un *jugement porté par le client ou l'utilisateur sur la base de ses attentes et motivations. Plus spécialement, c'est une grandeur qui croît lorsque la satisfaction de l'utilisateur augmente ou que la dépense y afférant diminue* (Afnor 2014).

La valeur du produit ne se limite donc pas à son prix. Elle sera ainsi d'autant plus grande qu'il satisfera les attentes du client pour des coûts associés aussi faibles que possible : prix d'achat, coûts d'utilisation, d'apprentissage, de maintenance, de fin de vie, etc.

La valeur peut donc être définie comme le rapport des fonctions ou fonctionnalités¹ du produit aux coûts associés à son utilisation, de son achat à sa fin de vie :

$$\text{valeur} = \frac{\text{fonctionnalités}}{\text{coûts}}$$

Par ailleurs, la qualité est définie comme *l'ensemble des propriétés et caractéristiques d'un produit ou d'un service qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites* (Afnor 2003; Organisation internationale de normalisation 2015). La valeur peut aussi s'exprimer comme le rapport de la qualité aux coûts associés au produit :

$$\text{valeur} = \frac{\text{qualité}}{\text{coûts}}$$

Cette définition correspond au rapport qualité/prix que le consommateur cherche à optimiser lors de l'achat.

Étant données les grandeurs mises en jeu dans ces deux définitions (fonctionnalités et qualité), la valeur semble difficilement mesurable. En revanche, ses variations peuvent être facilement analysées (Caelen 2013). Par exemple, la valeur d'un produit augmente

- si son coût diminue à fonctions égales ;

¹ Fonctionnalité : qualité de la fonction ; bonne adéquation ou réponse du produit à la fonction.

- si les fonctionnalités se multiplient à coût égal ;
- si la multiplication des fonctions du produit apporte à l'utilisateur une augmentation des satisfactions supérieure aux coûts associés aux nouvelles fonctionnalités (voir tableau 1).

		Coûts	
		Faibles	Élevés
Adéquation au besoin	Forte	Valeur élevée	Valeur moyenne
	Faible	Valeur faible	Valeur nulle

Tableau 1. Quantification de la valeur du produit par le rapport de l'adéquation au besoin aux coûts
(Maîtriser la conception par l'analyse de la valeur 1992)

La valeur peut ainsi être définie par le rapport de la satisfaction du besoin aux coûts :

$$\text{valeur} = \frac{\text{satisfaction du besoin}}{\text{coûts}}$$

(Maîtriser la conception par l'analyse de la valeur 1992).

Il convient de bien insister sur la différence entre valeur et prix. Le prix d'achat ne constitue qu'une partie du coût du produit, et n'intervient donc que dans l'une des deux composantes de la valeur, quelle qu'en soit la définition. Les deux aspects de la valeur économique sont néanmoins pris en compte : la valeur d'usage (dans une approche fonctionnelle) et la valeur d'échange (dont le prix d'achat constitue une partie du coût d'utilisation du produit). En supposant qu'un coût puisse être associé à chaque fonction, la valeur se définit donc par le couple fonctions/coûts. En considérant en outre que la mise à disposition d'un produit dans un délai donné peut être assimilée à une fonction particulière du produit (comme attente de l'utilisateur), on retrouve dans cette définition le triptyque central de toutes les analyses actuelles sur la compétitivité : coût/qualité/délai. (Caelen 2013)

Notons enfin que la valeur n'est propre qu'à un instant donné et n'a de sens que par rapport à d'autres produits et services déjà disponibles. Le client en intègre ses propres composantes, et chaque nouvelle offre qui apparaît sur le marché contribue à banaliser les éléments qui constituaient cette valeur. Plus les éléments valorisés par le client sont rares, plus la valeur qu'il confère au produit est élevée. (Caelen 2013)

Ce concept sera élargi dans le paragraphe suivant avec la notion de valeur *ajoutée* du produit.

2.2.2. La valeur ajoutée du produit

La *valeur ajoutée* du produit est égale à sa valeur de production diminuée des consommations intermédiaires. Elle correspond donc à la *valeur créée* (c.-à-d. *ajoutée*) à chaque étape de son processus d'élaboration, de l'extraction des matières premières à sa fabrication à proprement parler. La valeur ajoutée dépend alors de sa nature propre (c.-à-d. de ses constituants, de ses matériaux constitutifs), mais aussi de sa fonction.

Plus généralement, la *valeur ajoutée* consiste en toute transformation (amélioration) qui apporte au produit une valeur supplémentaire, le plus souvent économique. Elle peut donc s'accroître jusqu'à sa mise sur le marché en intégrant différents aspects marketing qui améliorent son image de marque. Enfin, elle varie continûment au cours de sa vie (c.-à-d. en cours d'utilisation ; voir § 3.3.4) en raison d'évolutions quantifiables (p. ex. usure, maintenance, mise à niveau, etc.) ou plus difficiles à évaluer (p. ex. effet de mode).

En conséquence, on distinguera les trois principaux aspects suivants de la valeur ajoutée :

- la *valeur ajoutée dite matière* (c.-à-d. liée à la nature des constituants). Elle est plus généralement associée aux composants les moins complexes (p. ex. pièces élémentaires). Elle résulte d'abord de la valeur propre de la matière (p. ex. matériaux stratégiques, terres rares, etc.). Néanmoins, elle dépend aussi des procédés d'obtention de cette matière (p. ex. plastiques issus de pétrole brut, métaux provenant des minéraux, alliages, etc.) ou des procédés de mise en œuvre de la pièce (p. ex. fabrication additive) ;
- la *valeur ajoutée fonctionnelle*. Elle est liée à la fonction du composant, et est donc plutôt associée à des sous-ensembles modulaires ou à des produits complets. Elle dépend d'abord de sa conception (qui assure son efficacité) ou de la complexité de son assemblage. Cependant là encore, tout procédé de fabrication spécifique peut augmenter sa valeur ;
- l'*image de marque*. Elle regroupe l'ensemble des représentations, à la fois affectives et rationnelles, d'un consommateur concernant le produit (TLFi s. d.). C'est donc la valeur que lui attache le consommateur. Différents facteurs psychologiques influent sur cette perception.

3. Le cycle de vie du produit

3.1. Définition du cycle de vie

Le cycle de vie du produit consiste en l'ensemble des phases consécutives et liées, de l'acquisition des matières premières ou de la génération des ressources naturelles, à l'élimination finale (ISO 2006a). Ainsi, comme c'est par exemple le cas dans certaines analyses de cycle de vie (Franz 2010; Fraunhofer IZM 2016), le cycle se limite à

- sa vie (voir § 3.3) : extraction et transformation des matières premières et production d'énergie, fabrication, distribution, utilisation et prolongement de la durée de vie ;
- et sa fin de vie² (voir § 3.4) : traitement du déchet.

Dans ce cadre, ce concept exclut le développement-même du produit (c.-à-d. sa conception), et se recentre sur la seule vie *physique* ou *matérielle* du produit.

Notre étude vise à fournir des outils au concepteur. Nous choisissons d'inclure son cycle de développement, c'est-à-dire de considérer la conception du produit comme part intégrante du cycle de vie. Cette approche est souvent retenue lorsqu'il s'agit d'une démarche d'écoconception (Le Diagon et al. 2014; Pôle éco-conception 2015; Q. Yang et Song 2006) car ces deux cycles s'imbriquent naturellement. Néanmoins la frontière entre l'*idée du produit* et son *émergence physique* est relativement floue, mais peut être située lors de la fabrication du premier prototype physique.

Enfin étant donnée l'approche à retenir dans ce travail et le poids à donner aux différentes phases du cycle de vie au sens où nous l'entendons, la suite du paragraphe s'articulera autour

- du cycle de développement du produit ;

² La fin de vie du produit ne s'entend pas ici comme la fin de vie de la matière, de ses composants ou du produit-même. Cette étape a pour objectif de préserver toute ou partie de la valeur contenue dans le produit, et prolonger ainsi sa vie, celle de ses composants ou de la matière le constituant. Cette phase débute par l'acquisition du statut de déchet sur lequel nous reviendrons plus amplement, et inclut tous les traitements qu'il peut alors subir. La fin de vie fait ainsi pleinement partie du cycle de vie du produit. Dans cette approche enfin, la « vie » s'achève seulement par la perte de toute valeur, c'est-à-dire dans l'élimination du déchet ultime.

Chapitre 1

Conception, vie et fin de vie d'un produit

- de la vie du produit ;
- et de sa fin de vie ;

de façon à mieux définir les liens entre les acteurs de la conception et ceux de la fin de vie (voir figure 1).

Remarque Nous ne retiendrons pas dans cette étude l'acceptation économique et commerciale du concept de cycle de vie du produit. Il y est décrit comme les cinq stades de commercialisation que le produit traverse : son développement, son introduction sur le marché (lancement), la croissance, la maturité et le déclin. (Pinel 2013)

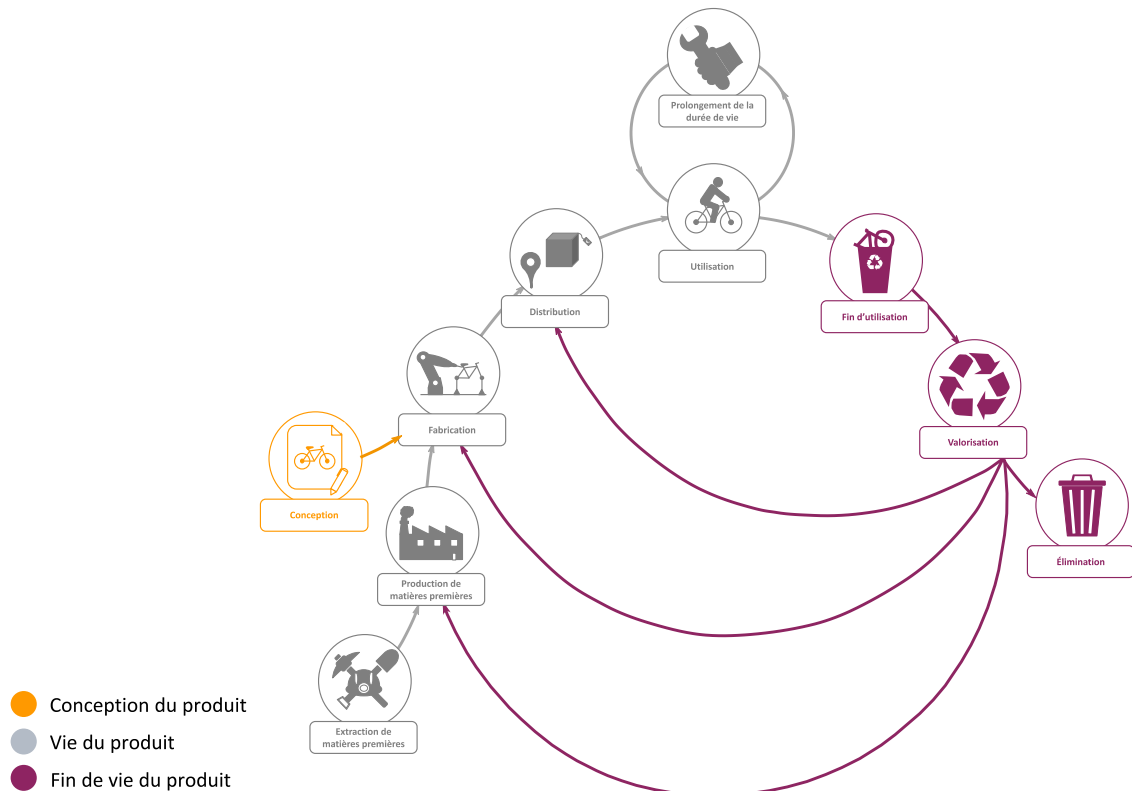


Figure 1. Représentation synoptique des trois phases clés du cycle de vie du produit (conception, vie et fin de vie), et prolongement des flux physiques au-delà de la fin d'utilisation pour « fermer les boucles », dans une optique d'économie circulaire.

3.2. Conception du produit

La *conception* est le processus de création ou d'invention, d'amélioration ou de modification d'un produit pour répondre à des besoins, résoudre des problèmes, proposer des solutions nouvelles ou explorer des possibilités permettant d'améliorer la qualité de vie de ses utilisateurs.

Le développement du produit se décompose en toutes les étapes nécessaires pour passer d'un concept ou d'une idée, à sa mise sur le marché. Le processus de développement présenté dans ce chapitre s'appuie sur les travaux de Pahl (Pahl, Beitz, Feldhusen, et Grote 2007), d'Ulrich et Eppinger (Ulrich et Eppinger 2011) et des guides synthétiques associés proposés par l'UQAR (UQAR s. d.).

3.2.1. Vue d'ensemble du processus de développement

Le processus de développement peut varier selon qu'il s'agit

- d'un nouveau produit pour l'entreprise ;
- d'un produit fondamentalement nouveau (rupture technologique, p. ex. transport en commun sans chauffeur) ou une nouvelle technologie qui précède l'identification de marchés potentiels (p. ex. le Gore-Tex®, le Velcro®) ;
- d'un produit amélioré, d'une nouvelle génération du produit ;
- d'un produit à reconcevoir
 - par l'apport de légères modifications (p. ex. moteur de voiture), ou sa personnalisation (p. ex. options d'un véhicule) ;
 - pour qu'il adopte une structure modulaire autour d'une *structure système* bien établie (p. ex. smartphone, ordinateur, copieur) ;
- d'un système complexe. Sa structure peut alors être vue comme plusieurs sous-ensembles sur lesquels peuvent travailler en parallèle différentes équipes (p. ex. moteur d'avion) ;
- d'un produit dont les méthodes de fabrication induisent de nombreuses contraintes (p. ex. produit alimentaire, sacs plastiques) ;
- d'un produit à haut risque. La difficulté peut alors être liée à une mise en œuvre délicate (p. ex. composant aéronautique) ou à une réponse incertaine du marché (p. ex. produit pharmaceutique) ;
- d'un produit à fabrication rapide. Différentes modélisations sont proposés et plusieurs prototypes sont réalisés jusqu'à ce que le budget ou le temps de développement soient épuisés (p. ex. logiciel).

Quelle qu'en soit la nature, le développement du produit se structure généralement comme suit (voir figure 2) :

- avant-projet (voir § 3.2.2) ;
- expression du besoin (§ 3.2.3) ;
- conception préliminaire (§ 3.2.4) ;
- conception détaillée (§ 3.2.5) ;
- prototypage (§ 3.2.6) ;
- et enfin industrialisation (§ 3.2.7).

3.2.2. L'avant-projet

L'*avant-projet* est la première étape du développement d'un produit.

L'objectif est de délimiter les contours du projet, d'en définir le cadre. Il débute par un état des lieux des développements technologiques et des attentes du marché. Un budget prévisionnel est fixé. Les jalons (c.-à-d. les étapes et les échéances), les prestations attendues (c.-à-d. les livrables), les acteurs, etc. sont identifiés. Les objectifs économiques que devra atteindre le produit à développer sont établis, et les premières contraintes de conception sont évaluées. L'*avant-projet* se termine par l'approbation du projet, et précède ainsi le processus de conception du produit.

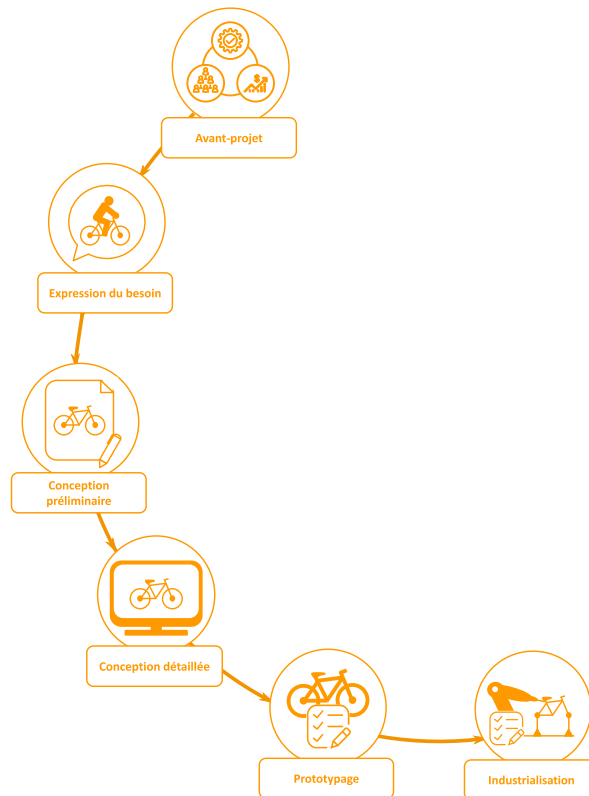


Figure 2. Étapes clés du processus de développement du produit

3.2.2.1. Identifier les défis du développement d'un produit

Développer un (nouveau) produit suppose de

- comprendre et gérer les contradictions du projet (p. ex. l'optimisation d'une fonction peut augmenter le coût du produit) ;
- appréhender la dynamique du contexte (c.-à-d. l'évolution des technologies ou des attentes du consommateur, la compétition liée à l'introduction de produits concurrents sur le marché, le contexte macro-économique, etc.) ;
- évaluer les conséquences de toute modification mineure (p. ex. ajout d'une vis supplémentaire) sur les coûts engendrés pour une production de grande série ;
- choisir, décider rapidement, même en l'absence de toutes les informations nécessaires ;
- investir suffisamment pour le développement du produit et sa mise sur le marché.

L'effort de développement peut alors s'évaluer suivant cinq critères :

- son coût (qui prend en compte l'investissement sur le système de production, les consommables, ainsi que le matériel nécessaire à la réalisation de l'unité de production) ;
- le temps de développement (qui exprime la réactivité de l'entreprise, sa compétitivité sur le marché et sa bonne gestion de l'ensemble des aspects du projet) ;
- le coût de développement (c.-à-d. l'investissement de l'entreprise pour mener à bien le projet) ;
- la capacité de développement (c.-à-d. l'aptitude de l'équipe de développement à concevoir de façon plus efficace encore de nouveaux produits) ;

- et bien sûr la qualité du produit (c.-à-d. la réponse aux attentes du client, la robustesse du produit, sa fiabilité, etc.).

3.2.2.2. La structure organisationnelle

L'efficacité du processus de développement d'un projet suppose qu'il s'intègre à une organisation structurée de différents acteurs. Le type d'organisation varie selon leurs relations formelles et informelles, et selon leurs fonctions.

3.2.2.2.1. Les acteurs

Le processus de développement d'un produit s'articule autour de trois familles d'acteurs ou d'équipes :

- le *Marketing* qui met en relation le client et l'entreprise. Il identifie les opportunités de produit, définit le marché et participe à la formalisation des besoins du consommateur ;
- le *Design*. L'équipe intervient au carrefour de l'ingénierie de conception (mécanique, électronique, logiciel, etc.) et de l'ingénierie industrielle (esthétique, ergonomie, interface *utilisateur*, etc.). Il définit l'aspect physique du produit ;
- La *Production* qui participe au design. Elle est responsable des opérations et systèmes de production, et réalise les achats nécessaires à la réalisation du produit.

3.2.2.2.2. Choisir la meilleure structure organisationnelle

Les ressources humaines d'un projet peuvent s'articuler par fonction ou par projet. La structure organisationnelle la plus appropriée pour une entreprise dépend du contexte dans lequel elle évolue. On peut ainsi distinguer les structures suivantes.

- La structure départementale favorise le développement en profondeur des compétences et de l'expertise de chaque département. La capitalisation des informations en interne est facilitée, mais la communication entre départements peut au contraire être ralentie ;
- Dans une structure par chargé de projet, les ressources peuvent facilement être optimisées selon les compétences de chacun. Une évaluation multicritère de la faisabilité d'un projet peut être rapidement réalisée. Cependant, l'identification d'experts au sein d'une équipe pluridisciplinaire se révèle souvent difficile, et la créativité est ainsi réduite ;
- La structure matricielle avec
 - intégration lourde d'un chargé de projet (équipe de production intégrée ou équipe de développement). Cette structuration assure des liens forts entre projets, mais maintient un responsable dans chaque département. Le chargé de projet a alors un contrôle complet du budget, de l'évaluation des ressources et de leur allocation ;
 - intégration légère d'un chargé de projet. Les liens entre projets sont plus ténus, mais ceux entre fonctions sont renforcés. Le chargé de projet agit plus comme un coordonnateur ou un administrateur. Il organise des réunions, met à jour la planification et coordonne l'ensemble des tâches de chaque département. Il ne contrôle en revanche pas le budget ; l'évaluation des ressources est transférée au responsable de chaque département.

3.2.2.3. Planifier le développement

La planification du développement du produit vise à établir le *portefeuille de compétences* (ou *portfolio*) nécessaire à la bonne réalisation du projet, son échéancier et les missions de développement du produit.

Cette phase de planification dépendra du fait que l'entreprise développe un nouveau produit, une nouvelle génération de produits, un produit fondamentalement nouveau (rupture technologique) ou propose simplement l'optimisation d'un produit existant.

3.2.2.3.1. Identifier les opportunités

La phase de planification débute donc par l'identification des opportunités de marché. Elles peuvent être collectées de façon passive, et les nouvelles idées peuvent provenir

- du service des ventes ;
- du département de recherche et développement (R & D) ;
- du département de production et des méthodes ;
- du consommateur (réel ou potentiel) ;
- ou d'un tiers (p. ex. un fournisseur, un actionnaire, etc.).

Néanmoins, une veille active permet de définir mieux encore les opportunités d'affaire

- grâce à une analyse des remarques et des plaintes des utilisateurs ou des consommateurs ;
- par une enquête auprès des utilisateurs (en portant une attention particulière aux modifications qu'ils apportent à un produit existant ou aux usages qu'ils en ont) ;
- en prenant en compte la mode, le style de vie, la démographie, l'évolution des technologies, etc. ;
- ou par une analyse des produits concurrents.

3.2.2.3.2. Évaluer et prioriser les projets

Une veille technologique et/ou l'analyse du marché pouvant conduire à définir un grand nombre de projets potentiels, il convient de définir ceux qui présentent le plus d'intérêt pour l'entreprise. Leur priorisation peut être évaluée suivant quatre perspectives :

- Une stratégie compétitive. Une stratégie organisationnelle offensive oriente les axes de développement permettant d'offrir une qualité supérieure et/ou un coût plus avantageux pour un produit équivalent. Ceci suppose donc une très grande réactivité face aux attentes des consommateurs et aux nouvelles tendances ;
- La segmentation du marché. La sélection du projet est guidée par le segment de marché que vise l'entreprise (p. ex. gamme de prix d'un véhicule, voyage *low-cost* (service), etc.) ;
- La technologie. Il convient de s'assurer que la technologie à la base de nouveaux projets soit suffisamment robuste pour être implantée dans la chaîne de production ;
- La plateforme *produit*. Les produits seront-ils mis en œuvre sur une plateforme existante ou sur une nouvelle ?

3.2.2.3.3. Affecter les ressources

La conduite simultanée d'un trop grand nombre de projets peut induire l'augmentation de la durée de développement de chacun et le report de la sortie des produits. En somme, cela peut conduire à la diminution de la productivité³, et donc à une diminution du profit. Il convient donc d'évaluer au mieux chaque étape ou

³ Productivité : efficacité avec laquelle les ressources sont transformées en production. Il s'agit donc du rapport entre les extrants (biens, produits ou services fournis) et les intrants (facteurs de production utilisés pour les obtenir, soit l'ensemble des moyens techniques,

chaque lot du projet. Le responsable du projet peut alors s'atteler aux étapes suivantes.

3.2.2.4. Finaliser l'avant-projet

L'avant-projet sommaire (APS) permet notamment de dimensionner le projet pour en estimer le coût. Une solution technique est proposée aux décideurs (principes retenus, d'architecture générale, etc.). L'APS est donc un élément clé du dossier de faisabilité.

Une équipe multifonctionnelle (marketing, production, conception, etc.) se rencontre pour définir le cadre du projet :

- description générale ;
- bénéfices attendus ;
- éléments clés en assurant le succès ;
- marché primaire visé ;
- marché secondaire envisagé ;
- hypothèses et contraintes ;
- parties prenantes et acteurs impliqués.

Une fois le projet correctement défini, les ressources peuvent être attribuées et les responsabilités distribuées ; c'est l'étape nommée *avant-projet définitif* (APD).

3.2.2.5. Avant-projet. Synthèse

La figure 3 propose une vue d'ensemble synthétique des étapes clés de l'avant-projet.

3.2.3. L'expression du besoin (définition du problème)

À l'issue de l'avant-projet, il convient de définir le projet à proprement parler. Ceci consiste à en définir le contexte, à identifier sa problématique (c.-à-d. l'ensemble des problèmes liés) et à en préciser l'objectif. *L'expression du besoin* (ou *définition du besoin*, ou *traduction du besoin*) marque ainsi la première étape du processus de conception. Il convient ainsi d'en définir le contexte. Une problématique (c.-à-d. l'ensemble de questions soulevées par le besoin exprimé) est ensuite identifiée. Les objectifs du projet peuvent alors être établis. La rédaction du cahier des charges (parfois abrégé en CdC) marquera la fin de cette première grande phase.

L'expression du besoin se divise en trois grandes étapes et s'achève par la rédaction du cahier des charges qui définit les besoins fonctionnels.

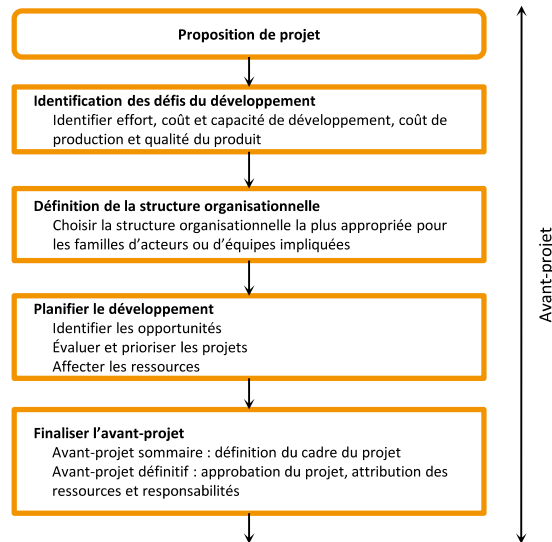


Figure 3. Représentation synoptique l'avant-projet du processus de conception du produit

3.2.3.1. Identifier les besoins du client

L'équipe de conception cherche ici à identifier les besoins réels du client, y compris les exigences non implicites. Il convient ainsi de prendre en compte toute l'information non verbale.

3.2.3.1.1. Recueillir l'information

Le recueil de l'information peut se faire par

- un entretien avec le client ;
- une enquête ;
- l'organisation d'un groupe de discussion ;
- ou l'observation du produit en situation d'utilisation.

3.2.3.1.2. Identifier les consommateurs

Une enquête auprès d'un panel représentatif de consommateurs ou de consommateurs potentiels peut conduire à identifier leurs besoins.

Dans le cas de la reconception d'un produit, son utilisateur peut être l'interlocuteur privilégié. Il peut en effet proposer des modifications visant à augmenter ses performances, s'il l'utilise déjà à pleine capacité.

3.2.3.1.2.1. Recueillir les besoins du client

L'entretien avec un client suppose d'être pleinement réceptif aux informations qu'il donne ; il faut donc éviter toute confrontation ou posture défensive. Il peut être animé autour de questions (« Quand et comment utilisez-vous le produit ? », « Quelles en sont les caractéristiques importantes ? », « Quelles améliorations lui apporter ? »). Il convient donc ainsi de ne pas rejeter les solutions proposées par le client même si elles paraissent d'ores et déjà non viables technologiquement ; cela permet au contraire d'exprimer d'autres besoins. Ce type d'échange doit évidemment être documenté (p. ex. avec un support visuel).

3.2.3.1.2.2. Exprimer le besoin réel du client

Cette information brute peut révéler plusieurs aspects des besoins du client. Il est donc préférable de l'analyser collectivement. Il faut alors

- exprimer le besoin en indiquant ce que le produit doit faire et non comment il doit le faire ;
- ne pas surinterpréter les besoins du client (Il convient donc de garder le même niveau d'information qu'à l'issue de l'entretien.) ;
- définir les besoins comme des fonctions du produit ou des actions possibles de l'utilisateur (p. ex. « L'utilisateur sera en mesure de visser cet élément... ») ;
- préférer les phrases positives (p. ex. « Le couvercle s'ouvre à 90° maximum... », plutôt que « Le couvercle ne s'ouvre pas au-delà de 90°... ») ;
- éliminer le verbe « devoir » (p. ex. « Le produit doit faire... ») dans la formulation des besoins.

3.2.3.1.3. Hiérarchiser les besoins

Selon le type de produit, la hiérarchisation des besoins peut être complexe. Il convient donc de les prioriser en distinguant les besoins primaires des secondaires. Cette hiérarchisation peut se faire

- en écrivant les besoins identifiés sur des fiches ou des Post-it® indépendants ;
- en éliminant les besoins redondants ;
- en regroupant les besoins similaires et en identifiant alors pour chaque famille un besoin général ;
- en redéfinissant des niveaux supérieurs (si trop de besoins primaires ont été identifiés) ;
- et en analysant enfin les résultats.

3.2.3.1.3.1. Établir l'importance relative des besoins

Selon les délais dont dispose l'équipe de développement, deux approches peuvent être suivies pour hiérarchiser les besoins :

- la première, très rapide, consiste à se baser sur son expérience propre. Une seule rencontre est alors nécessaire ;
- la seconde consiste à interroger les futurs clients pour approcher au mieux des besoins de l'utilisateur, sans pour autant définir avec les besoins clés du produit. Parallèlement, plusieurs actions peuvent débuter (comme la génération de concepts (voir § 3.2.4.1.1), l'évaluation des produits concurrents (§ 3.2.3.2.1.2), etc.).

Ces deux approches sont parfaitement compatibles.

3.2.3.1.4. Évaluer les résultats

La dernière étape consiste à analyser les résultats, mais aussi à corriger la procédure suivie. En effet, elle peut se prolonger si

- toutes les familles de consommateurs n'ont pas été consultées ;
- les besoins secondaires n'ont pas tous été clairement identifiés ;
- certains points méritent d'être approfondis ;
- certains acteurs initialement approchés doivent être recontactés dans les prochaines phases de développement ;
- certains acteurs retenus ne sont pas informés des besoins du client ;
- il y a peu d'informations acquises depuis le lancement du projet ;

- sa consolidation semble intéressante pour conduire de futurs projets.

L'identification des besoins du client est un processus itératif : si l'étape de validation des résultats n'est pas satisfaisante ou pleinement approuvée, l'ensemble du processus doit être reconduit.

3.2.3.2. Les spécifications du produit

Les spécifications sont les exigences que le produit doit satisfaire ; en d'autres termes, ce sont donc les caractéristiques que devra présenter le produit final. Elles expriment les besoins subjectifs du client et les traduisent en fonctions du produit.

3.2.3.2.1. Les spécifications cibles

3.2.3.2.1.1. Lister les caractéristiques

La liste des caractéristiques doit être exhaustive. Elles doivent suffire à décrire le comportement général du produit, sans pour autant présumer de la façon dont il sera conçu. Elles doivent pouvoir être évaluées non seulement par l'équipe de développement (si elles sont vérifiables, mesurables), mais aussi par les consommateurs (si elles sont subjectives). Ces caractéristiques pourront être des grandeurs physiques (c.-à-d. dimensionnées, affectées d'une unité), ou simplement caractérisées par une réponse binaire (vrai/faux, réussite/échec, etc.).

3.2.3.2.1.2. Caractériser les produits concurrents

Il faut caractériser les produits concurrents comme celui en cours de développement, de façon à bien définir sa place sur le marché.

3.2.3.2.1.3. Établir les valeurs idéales et les marges acceptables pour chaque caractéristique

Les caractéristiques sont évaluées par rapport à une valeur idéale (c.-à-d. le meilleur résultat que l'équipe peut espérer obtenir) et par une marge acceptable (c.-à-d. qui assure au produit d'être commercialement viable). Lors de leur identification, il faut regrouper les spécifications de même niveau (c.-à-d. avec le même niveau de détail du produit final), et les affiner au fur et à mesure de l'avancée du projet.

3.2.3.2.1.4. Reconsidérer les spécifications cibles

Plusieurs itérations sont nécessaires pour identifier les spécifications initiales, et s'assurer que leur liste est exhaustive. La viabilité du produit doit être évaluée, et les spécifications critiques (c.-à-d. celles qui ont un effet direct sur la vie commerciale du produit) doivent toutes être validées. Le choix d'options est également envisagé.

3.2.3.2.2. Les spécifications finales

Avant d'amorcer la conception à proprement parler, les spécifications sont réévaluées pour en éliminer les contradictions (p. ex. caractéristiques techniques trop élevées pour un produit devant rester bon marché).

3.2.3.2.2.1. Développer un modèle technique

À ce stade, le concept général est identifié. Le développement repose alors sur le choix de matériaux, les dimensions du produit, etc.

Un *modèle technique* doit être mise en œuvre. Cet outil sert à évaluer les caractéristiques finales du produit. Il permet donc de répondre aux questions de l'équipe de développement et d'établir les valeurs cibles des spécifications. L'équipe sera ainsi à même de conclure si le concept choisi répond bien aux spécifications et aux besoins du client.

3.2.3.2.2.2. Établir le modèle financier

Basée sur le modèle technique, l'estimation du coût de production doit permettre d'assurer que le développement du produit respecte le budget initial. Le coût de chaque service intégrant la réalisation du projet est estimé (en général en en proposant une version optimiste, une neutre et une pessimiste).

3.2.3.2.2.3. Raffiner les spécifications

À l'issue de la proposition des modèles technique et financier, les spécifications peuvent encore être raffinées en vérifiant que le produit répond bien aux besoins du client, et qu'il reste rentable.

3.2.3.2.2.4. Valider l'arborescence des spécifications

Il convient enfin de vérifier la concordance bijective des spécifications principales avec les secondaires. Par exemple, la consommation d'un véhicule va dépendre du moteur, de la transmission, de l'aérodynamisme, etc.

3.2.3.2.2.5. Reconsidérer les spécifications finales

En fin de processus, l'équipe vérifie une dernière fois que

- le produit répond bien aux besoins du client ;
- il est adapté au marché ciblé ou il peut facilement conquérir un nouveau marché ;
- il peut résister à la concurrence ;
- le niveau d'incertitude sur les hypothèses des modèles technique et financier reste raisonnable ;
- l'équipe de développement comprend suffisamment les principes physiques du modèle technique, ou qu'elle accepte qu'un effort d'ingénierie supplémentaire soit bien nécessaire pour maîtriser certains aspects.

La définition des spécifications du produit est un processus itératif. Si cette étape n'est pas approuvée, le processus doit être reconduit.

3.2.3.3. La planification du projet

3.2.3.3.1. La liste des tâches

Cette étape consiste d'une part à inventorier les tâches à réaliser, et d'autre part à évaluer l'effort nécessaire à l'accomplissement de chacune (p. ex. évaluation en personne-jour). Il s'agit donc d'exprimer un effort effectivement tenable (et non souhaitable) pour respecter les délais du projet.

3.2.3.3.2. L'échéancier

L'échéancier se construit à partir des objectifs identifiés et des livrables. Les dates de début et de fin de chaque phase (jalons) sont ainsi définies. Elles pourront néanmoins être ajustées pour atteindre les objectifs fixés en fonction de la durée d'achèvement des tâches.

En pratique, l'échéancier se construit par exemple sur un diagramme de Gantt.

3.2.3.3.3. Estimer les coûts du projet

Les éléments autour desquels le budget se construit sont l'équipe de développement, l'approvisionnement et les services, les équipements spécifiques au projet et les dépenses liées au développement externe.

3.2.3.3.4. Identifier les risques

Avant le lancement du projet, il convient d'identifier les risques, c'est-à-dire

- de lister les causes possibles de défaillance ;
- d'utiliser une échelle des probabilités d'occurrence des défaillances couplées à un degré de sévérité ;
- et d'identifier des actions permettant de les minimiser.

3.2.3.4. Le cahier des charges

Le cahier des charges traduit l'accord entre l'équipe de développement et le client sur les objectifs du projet et les ressources nécessaires à sa réalisation. Il situe le projet dans son contexte et en présente la problématique. Les éléments définissant le problème y sont listés : mandat, mission, besoin, spécifications enjeux professionnels, et planification des étapes de réalisation (Gantt, estimation budgétaire et ressources nécessaires).

3.2.3.5. Expression du besoin.**Synthèse**

La figure 4 propose une vue d'ensemble synthétique des étapes de l'expression du besoin.

3.2.4. La conception préliminaire

La conception préliminaire consiste à définir le concept qui répond le mieux aux besoins du client. Cette phase se divise ainsi en le développement de concepts (génération de concepts, expérimentation et/ou validation des concepts envisagés et sélection des plus prometteurs), l'ébauche du système (architecture et intégration des concepts) et l'étude préliminaire.

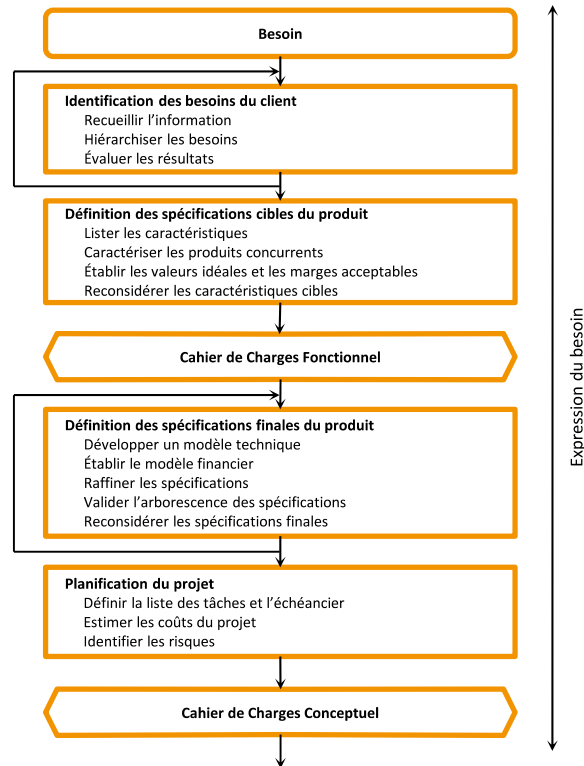


Figure 4. Représentation synoptique de la phase d'expression du besoin du processus de conception du produit.

3.2.4.1. Développer des concepts

Le concept du produit consiste en l'ébauche des technologies et principes de fonctionnement d'une part, et ses premières caractéristiques physiques (forme, dimensions approximatives, masse, etc.) d'autre part. Le concept se réduit ainsi à une esquisse et/ou une description.

La génération de concept coûte en général 5 % du budget total, et consomme 15 % du temps de développement.

L'activité débute par l'inventaire des besoins et des spécifications, et s'achève par la proposition de différents concepts de produits. L'équipe de développement devra les trier pour n'en sélectionner qu'un.

Les principales difficultés sont alors liées à

- la proposition de trop peu d'alternatives ;
- la sous-estimation des concepts concurrents ;
- une concertation trop restreinte au sein de l'équipe de développement ;
- la difficulté ou l'impossibilité d'intégrer certains concepts pourtant prometteurs ;
- la méconnaissance de certains principes de solutions.

3.2.4.1.1. La génération des concepts

Le problème étant à présent pleinement défini, l'équipe identifie les solutions au problème, les concepts qui peuvent satisfaire les spécifications et la méthode à utiliser pour générer des concepts de solutions.

3.2.4.1.1.1. La clarification du problème

Cette étape consiste à décomposer le problème principal en sous-problèmes simples pour mieux en percevoir les différents aspects. Il est alors plus facile de se focaliser sur les points critiques (c.-à-d. ceux ayant le plus d'impact sur l'ensemble du processus, ou dont l'impact peut avoir des conséquences sur d'autres). Plusieurs approches peuvent être suivies, en divisant le problème

- en fonctions : c'est la décomposition fonctionnelle. Un diagramme fonctionnel peut alors être construit, en restant conscient qu'il n'est pas unique. Les fonctions retenues doivent être simples, peu nombreuses (entre trois et une dizaine), et ne pas référer à un principe technique ;
- en séquences d'utilisation. Cette approche est intéressante si le schéma fonctionnel est très simple ;
- selon les besoins du client (p. ex. dans le cas de la reconception d'un produit usuel).

3.2.4.1.1.2. La recherche de concepts, de solutions

L'étape de recherche de solutions peut se faire

- au sein de l'organisation (séances de créativité, de *brainstorming*, etc.). Ceci suppose donc, pour concentrer les efforts, de générer le plus d'idées possibles autour d'une seule fonction à la fois, sans rejeter d'emblée les moins réalistes ;
- ou hors de l'organisation (revue bibliographique (dont analyse de brevets), webographie, consultation d'experts, etc.).

Cette recherche d'informations ne doit pas se limiter à la recherche de solutions, mais doit se poursuivre pendant tout le projet. On doit prendre en compte toute solution existante pour l'implanter, la modifier, l'adapter ou l'améliorer.

3.2.4.1.1.3. Exploration systématique

En général, plusieurs concepts peuvent être associés à chaque fonction. S'ils sont très nombreux, mettre en place un arbre de classification ou un tableau de combinaison permet d'organiser les idées.

3.2.4.1.1.4. Évaluation des solutions

Il s'agit d'évaluer et de critiquer la génération de solutions suivie, voire de la modifier. Il faut alors être certain que les idées de chaque membre aient été explorées.

3.2.4.1.2. Validation expérimentale des concepts

L'expérimentation vise à obtenir plus d'informations sur un aspect particulier du projet, pour diminuer les risques liés à l'incertitude sur son fonctionnement. Chaque expérience réalisée doit être suffisamment documentée pour permettre à un tiers de la reproduire.

3.2.4.1.2.1. Objectifs de l'expérimentation

Les objectifs de l'expérimentation et les résultats attendus ou recherchés (p. ex. dans le cadre d'une validation) sont définis. Des hypothèses accompagnent la construction de la démarche.

3.2.4.1.2.2. Choix et définition du protocole expérimental

Pour évaluer les grandeurs définies préalablement, il convient de choisir ou de concevoir un dispositif expérimental (un banc d'essai ou de caractérisation) et de définir les outils, montages et méthodes à associer.

Le protocole expérimental est alors défini (séquencement des opérations, mesures à effectuer et récupération des données).

3.2.4.1.2.3. Analyse et diffusion des résultats

Les résultats issus des opérations de caractérisations doivent alors être analysés, interprétés, pour en déduire des conclusions valides. La démarche totale doit enfin être critiquée. Les résultats peuvent alors être diffusés. L'ensemble du protocole est capitalisé en interne pour assurer le transfert des connaissances.

3.2.4.1.3. Sélection de concepts

Il est à présent possible de sélectionner les concepts retenus par des enquêtes, des groupes de discussion ou l'observation fine du produit en utilisation. Cette étape doit être rigoureusement cadrée pour

- s'assurer toujours de satisfaire les besoins du client ;
- rester objectif, minimiser l'impact de facteurs personnels ou subjectifs sur le choix du concept ;
- minimiser la probabilité que des facteurs personnels ou trop subjectifs influencent le choix du concept ;
- atteindre ou dépasser la concurrence ;
- améliorer la compréhension de tous les acteurs et la coordination du développement du produit.

Selon le nombre de solutions générées, la sélection peut alors se faire en deux temps par

- pré-sélection par matrice de filtrage ;
- sélection par matrice de décision.

Le développement des concepts est un processus itératif. Ainsi si les concepts générés ne sont pas satisfaisants, le processus doit être reconduit.

3.2.4.1.3.1. Pré-sélection par matrice de filtrage

La matrice de filtrage est construite à partir

- des seuls concepts les plus prometteurs. Ils sont présentés avec le même niveau de détail (description écrite, graphique, etc.).
- des critères de sélection. Ils incluent les besoins du client et ceux de l'entreprise (p. ex. coût de fabrication).

Une référence est choisie. C'est généralement une solution standard de l'industrie ou un concept largement éprouvé, avec lesquels les membres de l'équipe sont familiers. Les autres concepts lui sont alors comparés (meilleur/aussi bon/moins bon). Cette hiérarchisation est facile pour des critères objectifs (p. ex. nombre de modules, d'opérations, etc.) ; s'ils sont subjectifs, l'équipe attribue une note par consensus.

Un bilan est alors dressé pour classer les concepts et identifier le meilleur. Néanmoins, il est encore possible d'en améliorer, ou d'en combiner plusieurs pour combler certaines lacunes et ne garder que les meilleurs aspects. Ces nouvelles propositions doivent évidemment être confrontées à la matrice de filtrage.

La sélection des concepts les plus prometteurs s'opère lorsque toute l'équipe est assurée d'avoir bien compris chaque concept. (Le fait qu'un membre soit en désaccord peut indiquer l'absence d'un critère de

sélection clé dans la matrice de filtrage.) Le nombre de solutions retenues est limité par les ressources de l'équipe (personnel, temps, budget).

Enfin, chaque membre doit se positionner explicitement sur les résultats. Cela réduira les erreurs et favorisera son entière implication dans les étapes ultérieures de développement.

3.2.4.1.3.2. Sélection définitive par matrice de décision

La sélection définitive des concepts s'appuie sur la matrice de décision. Elle peut être construite comme la matrice de filtrage, mais avec des critères de sélection plus précis et des concepts mieux définis. En outre, les critères sont pondérés (p. ex. par des poids de 1 à 5 selon que la performance est très inférieure à la référence ou bien supérieure). La matrice peut aussi se construire selon les marchés visés pour déterminer si un concept est intéressant sur plusieurs segments.

À l'issue de cette analyse, l'équipe peut toujours améliorer un concept en supprimant un aspect négatif, ou en combiner encore certains pour combler les lacunes.

Enfin, il convient en général de ne pas retenir qu'un seul concept : il faut en effet s'accorder une certaine latitude pour le prototypage, les essais mécaniques, les essais avec les utilisateurs, etc.

L'équipe de développement peut alors dresser un bilan de la sélection. (Tous les aspects ont-ils bien été considérés ? Le client sera-t-il satisfait ? Le produit pourra-t-il être un succès économique ? Etc.) Un dernier bilan peut également être dressé sur la procédure de sélection suivie.

3.2.4.2. Définition préliminaire

La définition préliminaire est la première étape de la définition de l'architecture du produit. Elle consiste à décomposer le produit en sous-systèmes ou composants, et à intégrer les différentes solutions pour chaque fonction. Dans cette étape, les formes globales sont définies, le dimensionnement préliminaire est réalisé et les matériaux et procédés de fabrication préliminaires sont sélectionnés. Il s'agit donc d'une première ébauche du système.

3.2.4.2.1. Architecture du produit

Un produit peut être considéré comme un assemblage de fonctions ou de pièces : les éléments fonctionnels contribuent à la performance du produit, les éléments physiques sont les pièces, composants et modules qui assurent ces fonctions. L'architecture du produit est donc l'arrangement de ces éléments dont il convient ici de définir les interactions (voir § 3.2.4.2.2).

3.2.4.2.2. Intégration des concepts

L'intégration des concepts consiste grâce au schéma fonctionnel à vérifier la validité du concept final. Une ébauche fonctionnelle du système est proposée pour en valider les constituants. Il est possible dès lors de débiter la fabrication de prototypes pour les valider.

3.2.4.3. Validation de la définition préliminaire

La solution préliminaire est évaluée (p. ex. par des simulations, des essais, des prototypes, etc.) et son adéquation aux besoins spécifiés est vérifiée via les critères d'acceptation définis dans le cahier de charges conceptuel.

Si la solution préliminaire n'est alors pas approuvée, une nouvelle définition préliminaire doit être proposée.

3.2.4.4. Bilan de la conception préliminaire

Cette étape consiste à rédiger un rapport argumenté présentant les différentes solutions envisagées et retenues. Il doit permettre au client de comprendre et approuver les solutions retenues. C'est un résumé du travail de l'équipe de développement, du contexte de l'étude (voir § 3.2.2) à la présentation du schéma fonctionnel (§ 3.2.4.2.2), en décrivant bien entendu les étapes du raisonnement ayant permis d'atteindre la solution retenue (§ 3.2.4.1.3).

3.2.4.5. Conception préliminaire.

Synthèse

La figure 5 propose une vue d'ensemble synthétique des étapes de conception préliminaire.

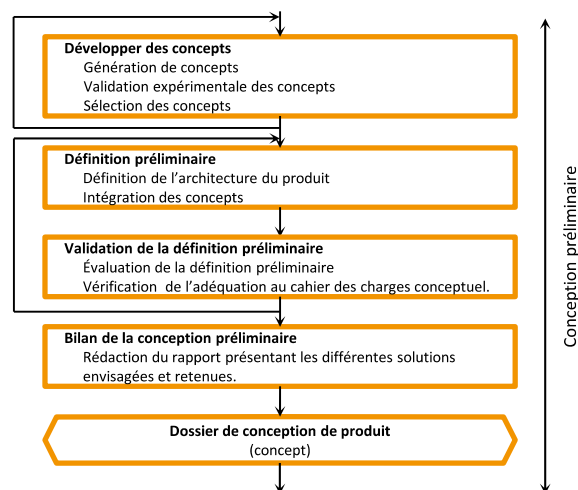


Figure 5. Représentation synoptique de la phase de conception préliminaire du processus de conception du produit.

3.2.5. La conception détaillée

La conception détaillée vise à clore la définition de l'architecture du produit et à fournir les plans nécessaires à sa réalisation. La disposition, les formes, les dimensions, les tolérances, les matériaux, les procédés de fabrication, les plans et les nomenclatures sont donc définis de façon définitive dans cette étape. Ils seront accompagnés d'un devis les détaillant et rappelant les spécifications techniques et les spécificités de chaque composant.

3.2.5.1. Définition définitive

Cette étape consiste à définir les aspects fonctionnels de la conception ainsi qu'à dimensionner chaque composant du système.

3.2.5.1.1. Cotation fonctionnelle

La cotation fonctionnelle découle directement de l'analyse fonctionnelle. Elle consiste à dimensionner les pièces et à établir un compromis entre la précision requise pour le bon fonctionnement du produit et les contraintes techniques et économiques. Il faut ainsi

- identifier les composants critiques du produit, et commencer par les dimensionner ;
- définir alors les calculs pertinents :
 - les calculs fondamentaux (puissance, résistance, performance, etc.) ;
 - les jeux fonctionnels (chaînes de cotes, ajustements normalisés, etc.) ;
 - les tolérances de fabrication ;
- et référencer et documenter les calculs par la description du problème (schématisation, données, inconnues, etc.), la définition des hypothèses (estimations, justifications, etc.) et l'analyse des résultats.

Les calculs doivent être suffisamment documentés et détaillés pour permettre à quiconque de les (ré)utiliser aisément.

3.2.5.1.2. Choix des composants et sélection des matériaux

Cette étape consiste non seulement à choisir composants et matériaux, mais surtout à vérifier leur disponibilité et leur coût.

3.2.5.1.3. Évaluation des coûts du projet

L'analyse des coûts du projet doit intégrer non seulement ceux des pièces achetées « sur étagère », mais aussi ceux associés aux livraisons, aux services de sous-traitance, à l'assemblage, au personnel (sous-traitants, stagiaires, etc.).

3.2.5.2. Prototypage virtuel

Les composants sont à présents choisis (dimensions définies et matériaux sélectionnés) et leur assemblage est défini dans un niveau de détail assurant la fonctionnalité du système. Le prototypage peut alors débuter. Plusieurs approches peuvent être suivies selon type de produit, le secteur d'activité (alimentaire, textile, métallurgie, bois, énergie, etc.) ou encore les habitudes ou la philosophie de l'entreprise : conception pour X (DfX : *design for X*), Conception en vue de la fabrication et de l'assemblage (DfMA : *design for manufacturing and assembly*), conception à valeur ajoutée (*lean design*), ingénierie simultanée, etc. Ces méthodes ou philosophies de conception seront détaillées au § 3.2.1 du Chapitre 2.

Cette étape s'accompagne de la prise en compte des règles de sécurité en fabrication (conception pour la sécurité). En quelques mots, ceci intègre

- la capacité de la machine, c'est-à-dire en particulier la définition de ses limites en utilisation (cadence de production, puissance, etc.), dans l'espace (amplitude des mouvements, interface opérateur-machine, etc.) et dans le temps (entretien et vie utile des outils, fluides, énergie, etc.) ;

- l'identification des dangers : tâches dangereuses (transport, installation, opération, entretien, élimination) et phénomènes dangereux (mécanique, électrique, thermique, bruit, rayonnement, laser, matière dangereuse, ergonomie, etc.) ;
- l'évaluation des risques (en termes de niveau (grave ou léger), d'exposition (fréquente ou rare) et d'évitement (probable ou non)) ;
- et la réduction des risques (élimination du phénomène dangereux par la conception, application de mesures de protection et mise en œuvre de contrôles administratifs ou d'autres mesures de prévention).

***Remarque** Par opposition au prototypage virtuel, le prototypage réel intervient ultérieurement dans le processus de conception, et suppose que le produit physique soit en cours de réalisation (voir § 3.2.6.1).*

3.2.5.3. Plans et devis

Les plans et devis marquent la fin de l'étape de conception détaillée, et toutes les informations nécessaires à la réalisation du projet doivent s'y retrouver.

3.2.5.3.1. Les plans

Selon la nature du projet, les plans peuvent comporter

- les dessins de fabrication et d'assemblage ;
- les schémas électriques et de câblage ;
- les tracés de circuits imprimés ;
- les algorithmes et organigrammes de programmation ;
- les codes informatiques ;
- la liste détaillée des pièces à acheter ;
- les procédures d'assemblage ou d'installation ;
- etc.

3.2.5.3.2. Le devis

Le devis rappelle tous les éléments évoqués jusqu'alors : matériaux choisis, équipements, spécifications techniques et autres caractéristiques nécessaires à la réalisation du produit.

3.2.5.4. Conception détaillée.

Synthèse

La figure 6 propose une vue d'ensemble des étapes de la conception détaillée.

3.2.6. Le prototypage

Après l'établissement des plans et du devis, le prototypage (physique) du produit peut débuter. L'équipe de développement conçoit un prototype fonctionnel et complet. Rappelons que c'est à partir de ce point que débute *la vie physique* du produit telle qu'évoquée au § 3.1, et que le cycle de développement se raccorde au cycle de vie tel qu'habituellement considéré.

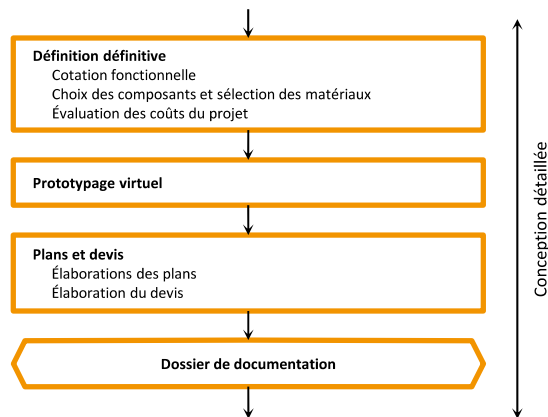


Figure 6. Représentation synoptique de la phase de conception détaillée du processus de conception du produit.

3.2.6.1. Réalisation du prototype

La fabrication du prototype suppose en premier lieu de coordonner les tâches pour assurer une fabrication fonctionnelle rapide. Il est alors nécessaire de s'en tenir aux objectifs de départ (pas d'ajout de fonctionnalités nouvelles) et de faciliter les échanges d'informations clés.

Le responsable du prototypage établit le chemin critique pour commencer par les tâches les plus longues à réaliser et celles qui pourraient compromettre le fonctionnement en cas d'imprévu, en superposer certaines, regrouper les périodes tampons de chaque tâche sous une période tampon unique à la fin du projet, et fournir un suivi actualisé de l'avancement des travaux. L'objectif est d'optimiser le temps de fabrication.

3.2.6.2. Essais et optimisation

Il convient alors de valider si le prototype fabriqué répond aux exigences initiales. Des essais de validation et d'optimisation du produit (raffinement) doivent être rapidement réalisés et à moindre coût. Cette étape peut s'articuler comme suit :

- la planification des essais pour en optimiser les résultats et le temps investi. Il faut alors identifier les spécifications à valider, se concentrer sur les plus critiques, définir les variables à considérer et les grandeurs à mesurer, et définir les techniques expérimentales adéquates ;
- la réalisation des essais à proprement parler ;
- l'analyse des résultats pour bien illustrer le comportement du système ;
- l'identification des améliorations à apporter pour atteindre les spécifications de départ.

Le prototypage est un processus itératif : si le prototype n'est pas validé lors des essais, l'ensemble du processus doit être reconduit (depuis la réalisation du prototype) en vue de son optimisation.

3.2.6.3. Documentation

La réalisation du projet s'accompagne de la rédaction d'un dossier pour rendre compte de toutes les informations accumulées depuis son lancement.

Parallèlement, un rapport *client* présente le produit fabriqué, la description du fonctionnement et le bilan du projet. Outre le rappel de la problématique, ce rapport décrit le produit et ses composants, présente le

prototype et ses résultats (spécifications réelles, performances, qualités et défauts, différences entre les demandes du client et le produit fabriqué, etc.).

3.2.6.4. Le prototypage.

Synthèse

La figure 7 propose une vue d'ensemble de la phase de prototypage.

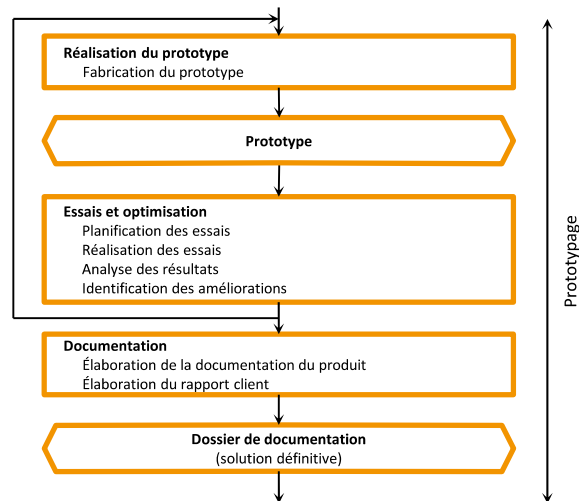


Figure 7. Représentation synoptique de la phase de prototypage du processus de conception du produit

3.2.7. L'industrialisation

(Mise en production)

L'industrialisation doit d'abord assurer de corriger tout problème rencontré lors de la fabrication du prototype. Elle assure par ailleurs de mettre en place les procédés et outils permettant la réalisation du produit à grande échelle.

3.2.7.1. Mise en œuvre du processus de fabrication

Cette étape implique la mise en œuvre de la production dans un premier temps (c.-à-d. définition de la gamme, mise en place des machines, programmation des machines, définition des outillages et de la stratégie de contrôle, formation du personnel, approvisionnement des matériaux, etc.) et la mise au point des procédés de fabrication dans un deuxième temps.

3.2.7.2. Revue de conception

La revue de conception permet de valider que le produit alors prêt à être mis sur le marché répond bien aux attentes et aux besoins du client. Ainsi, cette étape assure

- de vérifier la fonctionnalité du produit ;
- de valider sa conformité aux spécifications ;

- d'éliminer les problèmes rencontrés en conception ;
- de réduire les coûts de fabrication et d'assemblage par une meilleure conception ;
- d'améliorer la fiabilité du produit ;
- le cas échéant, de proposer des solutions pour réduire les écarts entre spécifications et résultats ;
- et de corriger les problèmes rencontrés lors de la fabrication du prototype.

Si des non-conformités sont identifiées, les problèmes doivent être corrigés et la revue doit être reconduite.

3.2.7.3. Validation de la production en série

Dans cette étape, la production en série est évaluée (cadence, qualité, etc.) à partir des premiers de série. Elle est validée lorsque les critères de performance sont atteints.

Si les objectifs de performance et de qualité définis pour la production en série ne sont pas atteints, de nouvelles solutions doivent être proposées et validées. Il s'agit là encore d'un processus itératif.

3.2.7.4. Les plans et devis officiels

Les plans et devis officiels constituent la documentation finale du projet. L'équipe de développement s'est donc assurée que les changements de la revue de conception ont été pris en compte. C'est également à cette étape que les plans sont signés et figés par l'ingénieur.

3.2.7.5. Industrialisation.

Synthèse

La figure 8 propose une vue d'ensemble synthétique de la phase d'industrialisation.

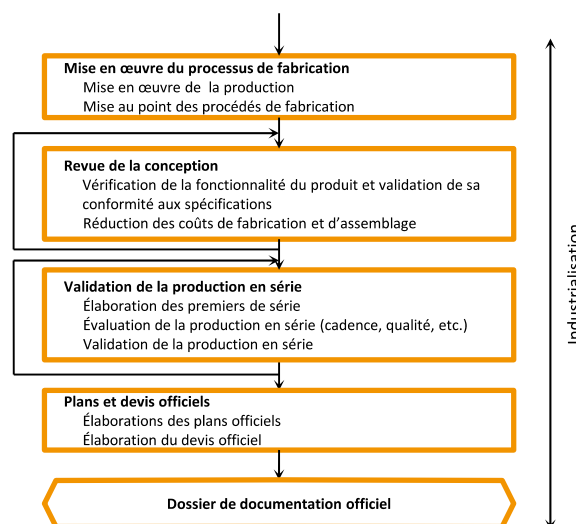


Figure 8. Représentation synoptique de la phase d'industrialisation du processus de conception du produit

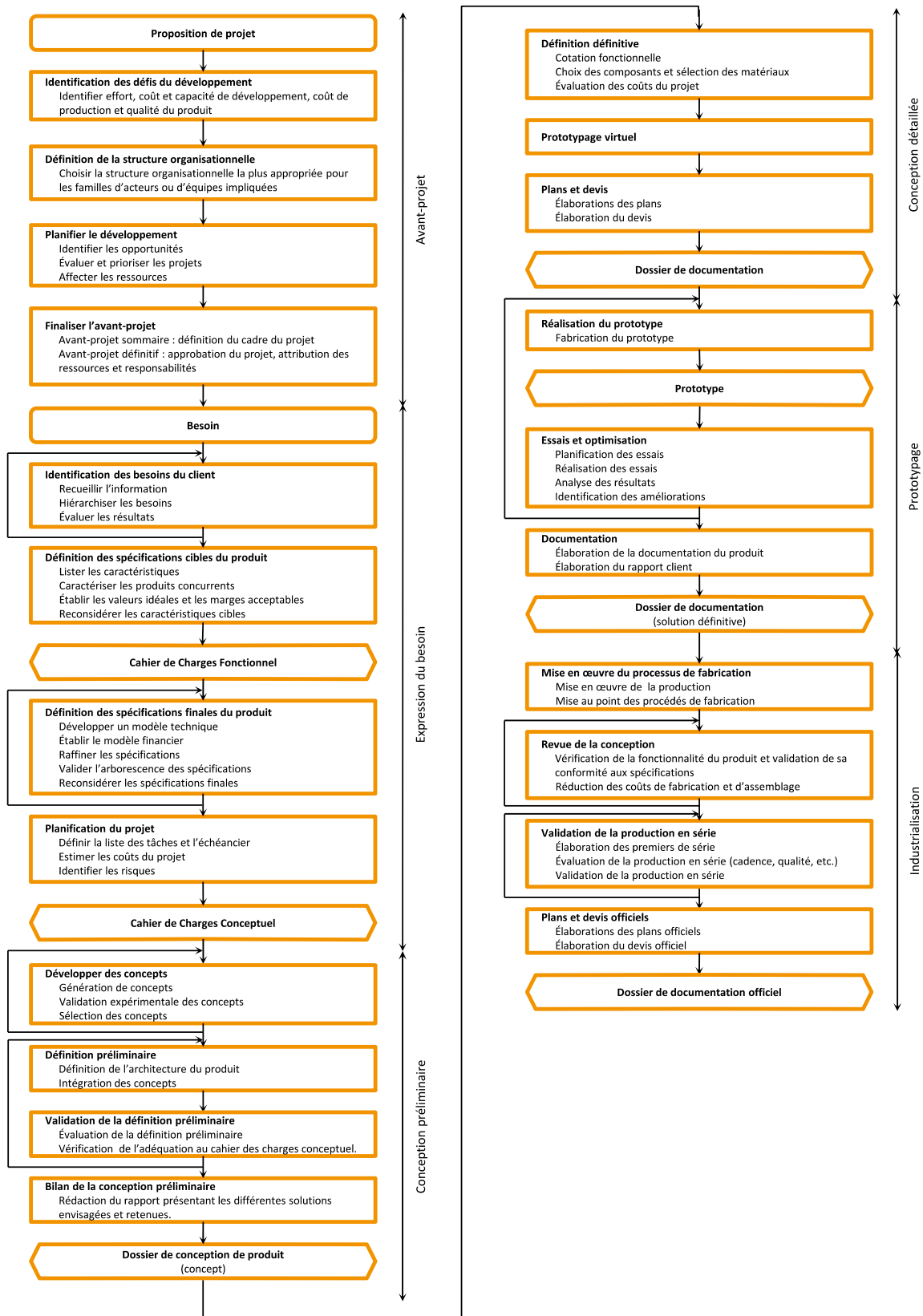


Figure 9. Représentation synoptique du cycle de développement

3.2.8. Cycle de développement du produit.

Synthèse

En écho à la figure 2, l'enchaînement des étapes présentées des figures 3 à 8 est repris à la page précédente.

3.3. Vie du produit

On appelle *vie* du produit l'ensemble des étapes du cycle de vie du produit telles que schématiquement représentées sur la figure 10.

Le découpage de la vie du produit retenu dans ce chapitre exclut la conception du produit pour se concentrer sur sa vie *physique*, c'est-à-dire pour laquelle le produit se conçoit dans sa dimension *matérielle*. Elle s'étend donc de l'extraction des matières premières jusqu'à ce que le produit « meure » et soit assimilé à un déchet⁴.

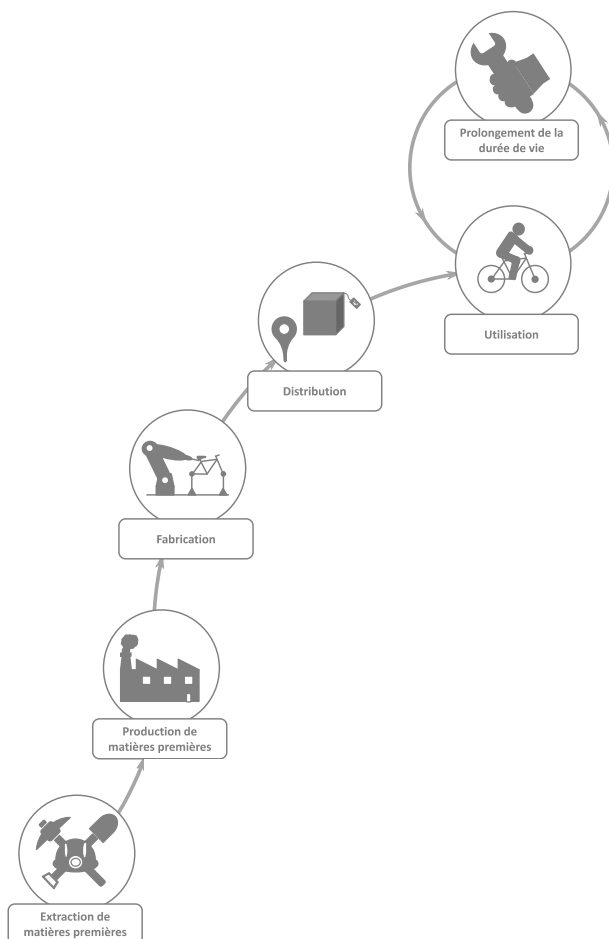


Figure 10. Représentation schématique de la phase de vie du produit

⁴ Ce découpage est évidemment critiquable car le prototypage ou la mise en production auraient bien entendu pu faire partie de la vie du produit au sens donné ici. Toute autre décomposition de la vie du produit aurait ainsi été tout aussi valable.

3.3.1. Extraction et transformation des matières premières, et production d'énergie

La première étape nécessaire à une vie *physique* du produit consiste évidemment en l'extraction des ressources naturelles et en la transformation de ces ressources en matières premières. Dans le cadre de l'économie circulaire (voir § 1), cette phase englobe aussi la production des matières premières secondaires (c.-à-d. recyclées).

Parallèlement, on prend aussi en compte dans cette étape la production de l'énergie nécessaire au fonctionnement du produit tout au long de son cycle de vie (c.-à-d. de sa fabrication aux opérations de traitement en fin de vie).

La production d'énergie s'est souvent limitée à l'utilisation de sources d'énergies non renouvelables telles que le charbon, le diesel ou le gaz naturel. Aujourd'hui, elle reste encore majoritairement basée sur les énergies fossiles (ADEME 2017e) : en 2015, elles intervenaient dans 67% du mix énergétique mondial (41% pour le seul pétrole) (CEA 2018). Cependant depuis quelques années, la production d'énergie renouvelable émerge (p. ex. solaire, éolien, etc.).

Concernant la production mondiale d'électricité, le charbon reste la source d'énergie majoritaire (38,3 %). La répartition des autres sources d'énergie est présentée à la figure 11. (CEA 2018)

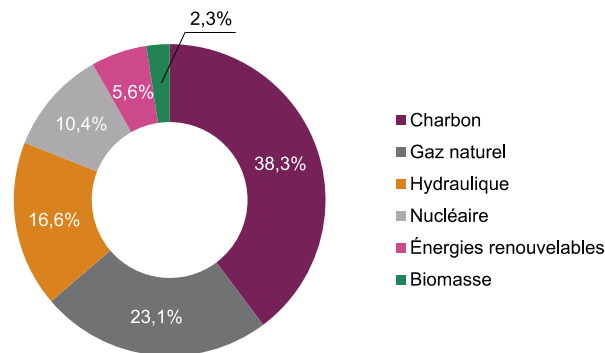


Figure 11. Répartition de la production mondiale d'électricité en 2015

3.3.2. Fabrication

Cette deuxième étape consiste en la fabrication du produit. Elle découle directement de la fin du processus de conception (voir § 3.2). Elle englobe les processus industriels de fabrication, les traitements thermiques et mécaniques, l'assemblage, l'emballage, etc.

3.3.3. Distribution

La distribution englobe tous les aspects de logistique et de transport (achats, livraisons, etc.) tout au long du cycle de vie du produit. Cette étape ne prend donc pas seulement en compte les aspects logistiques précédant directement la vente du produit tel que suggéré par la figure 10 (c.-à-d. entre la fabrication et l'utilisation), mais comprend aussi ceux mis en œuvre depuis l'extraction des matières premières.

3.3.4. Utilisation

Cette phase débute avec l'achat du produit et s'arrête lorsque le dernier détenteur s'en défait. C'est au cours de cette phase que le produit remplit la fonction pour laquelle il a été conçu. Il s'agit donc de la *vie utile* du produit. Cette phase est en étroite relation avec les activités de prolongement de la durée de vie (voir § 3.3.5)

3.3.5. Prolongement de la durée de vie

Cette étape comprend l'ensemble des *opérations préventives* permettant d'augmenter la durée de vie du produit comme la maintenance (préventive et corrective), la mise à niveau (*upgrading*) et le réemploi (revente, don, mutualisation, etc.).

3.3.5.1. Maintenance préventive

Cette forme de maintenance englobe toutes les opérations exécutées à intervalles indéterminés ou selon des critères prescrits, et destinées à diminuer la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement du produit. (AFNOR 2001)

3.3.5.2. Maintenance corrective

La *maintenance corrective* (ou *curative*) est exécutée après détection d'une panne, et destinée à remettre le produit en l'état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. (AFNOR 2001)

3.3.5.3. Mise à niveau

La *mise à niveau* (ou *upgrading*, ou mise à jour, ou amélioration, ou modernisation, ou *retrofit*) recouvre l'ensemble des mesures techniques, administratives et de gestion, destinées à améliorer la sûreté de fonctionnement d'un bien sans changer sa fonction requise (AFNOR 2001).

Par extension, cela inclut aussi toutes les opérations permettant l'ajout de nouvelles technologies ou fonctions qui n'étaient pas disponibles sur le produit originel.

3.3.5.4. Réemploi⁵

Le réemploi désigne toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisées de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus. (« Code de l'environnement | Legifrance » s. d.)

On y retrouve donc les actions telles que le don, la revente ou même la mutualisation pour lesquelles aucune opération technique n'est nécessaire, et qui permettent de prolonger la durée de vie du produit.

3.3.6. Fin d'utilisation et notion de déchet

La fin d'utilisation est une étape de transition indiquant le moment où le produit sort de la phase d'utilisation

⁵ Le *réemploi* doit être clairement distingué de la *réutilisation* où le produit a d'abord été assimilé à un déchet (voir § 3.3.6.1 et § 3.4.2.3.1.1).

et entre dans sa fin de vie. Elle peut être provoquée par plusieurs causes qui seront analysées ultérieurement (voir § 3.3.6.2).

Nous insistons d'ores et déjà sur la différence entre *fin d'utilisation* et *fin de vie* (voir § 3.4) qui ne doivent pas être confondus.

3.3.6.1. Notion de déchet.

Définition

La Directive 2008/98/CE définit un déchet comme toute substance ou objet dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2008).

Le terme *produit en fin de vie* peut aussi être utilisé pour parler d'un déchet car il concerne un produit dont l'utilisation est finie et qui se retrouve ainsi dans sa phase de fin de vie.

3.3.6.2. Causes de la fin d'utilisation

Les causes de la fin d'utilisation d'un produit sont multiples. Le classement proposé ci-dessous s'appuie en grande partie sur celui du Pôle éco-conception (Pôle éco-conception 2015).

3.3.6.2.1. Causes technologiques

Le premier ensemble de causes fait référence à des problèmes liés au fonctionnement du produit (p. ex. défaillance, ou évolution technologique rendant le produit obsolète) :

- la fonction principale du produit a été altérée ou ne fonctionne plus ;
- une fonction secondaire a été altérée ou ne fonctionne plus, ce qui est perçu comme suffisamment gênant pour que le produit soit considéré en fin de vie ;
- la durée de vie a été établie dès la conception (obsolescence programmée) ;
- le produit n'est pas réparable, ou difficile ou coûteux à réparer ;
- le produit est rendu obsolète au regard des évolutions technologiques.

3.3.6.2.2. Causes marketing

Le deuxième ensemble de causes fait référence au mode de consommation et au *marketing* (c.-à-d. à la mercatique) :

- le coût d'utilisation est élevé (consommables, énergie, etc.) ;
- la qualité réelle est perçue comme mauvaise (produit esthétique, mais peu pratique à l'usage) ;
- le design devient dépassé (perte d'estime du produit) ;
- les besoins des clients évoluent ;
- le marché évolue (produit démodé).

3.3.6.2.3. Causes accidentelles

Le troisième ensemble de causes fait référence aux accidents qui précipitent la fin d'utilisation du produit :

- préjudice esthétique (salissure indélébile, trace de choc, etc.) ;
- fin de vie précoce due à un usage détourné ;
- fin de vie précoce due à un usage hors capacité ou dans de mauvaises conditions de fonctionnement ;
- mauvais usage du dispositif par un utilisateur inapte à son utilisation ;
- chute accidentelle.

3.4. Fin de vie du produit

3.4.1. Objectifs

La fin de vie du produit débute lorsque le produit acquiert le *statut de déchet* (voir § 3.3.6.1). Il est alors nécessaire de gérer au mieux les déchets ainsi induits et de minimiser leurs impacts négatifs sur l'environnement et sur la santé humaine. La fin de vie s'intéresse ainsi à trouver des moyens de valoriser ces déchets ou à les éliminer avec le moindre impact.

Les grands enjeux de la politique de déchets sont :

- de préserver l'environnement ;
- d'éviter les risques de pénuries d'exutoires ;
- d'économiser les ressources et alimenter l'industrie en matières premières ;
- de maîtriser les coûts ;
- de s'intégrer dans l'économie circulaire (actions sur les produits, la consommation, les territoires). (ADEME 2019b)

La *fin de vie* du produit consiste donc en l'ensemble des étapes représentées schématiquement sur la figure 12.

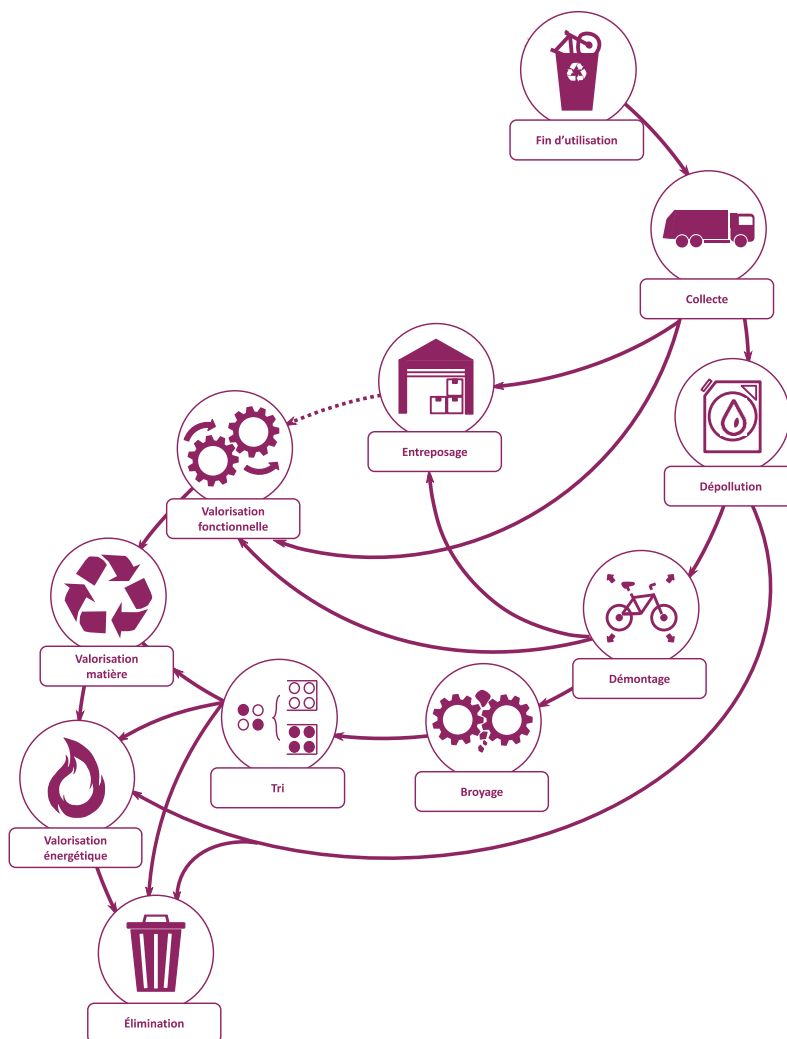


Figure 12. Représentation schématique de la phase de fin de vie du produit

3.4.2. La gestion de déchets

D'après l'article L.541-1-1 du code de l'environnement, la *gestion de déchets* est définie comme la collecte, le transport, la valorisation et l'élimination des déchets, et plus largement, comme toute activité participant de l'organisation de la prise en charge des déchets, de leur production à leur traitement final, en incluant toutes les activités de négoce ou de courtage et la supervision de l'ensemble de ces opérations. (« Code de l'environnement | Legifrance » s. d.)

3.4.2.1. Sortie du statut de déchet

Certains déchets cessent d'en être lorsqu'ils subissent une opération de valorisation ou de recyclage, et qu'ils répondent à des critères spécifiques définis par les conditions suivantes (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2008) :

- la substance ou l'objet est couramment utilisé à des fins spécifiques ;
- il existe un marché ou une demande pour une telle substance ou un tel objet ;
- la substance ou l'objet remplit les exigences techniques aux fins spécifiques et respecte la législation et les normes applicables aux produits ;
- et l'utilisation de la substance ou de l'objet n'aura pas d'effets globaux nocifs pour l'environnement ou la santé humaine.

Cela suppose que le déchet ait été pris en charge par une filière de traitement (voir Chapitre 2, § 3.1.1.1.2).

3.4.2.2. Hiérarchie de traitement des déchets

La directive cadre sur les déchets (Ministère de la Transition écologique et solidaire s. d.; Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2008) propose cinq voies principales de traitement des déchets, hiérarchisées comme suit, de la meilleure à la pire :

- la prévention ;
- la préparation en vue de la réutilisation ;
- le recyclage ;
- d'autres valorisations, notamment la valorisation énergétique ;
- et l'élimination.

Cette directive précise aussi que certains flux de déchets spécifiques peuvent s'écarter de cette hiérarchie de façon à assurer le meilleur résultat global sur l'environnement.

Il faut préciser que la prévention n'est pas une voie de traitement en fin de vie en soi, mais une action à réaliser en amont. Son but est en effet d'éviter la production de déchets et/ou de limiter leur dangerosité par différentes actions comme le prolongement de la durée de vie des produits. Cette action est essentielle car réduire la production de déchets permet de diminuer les impacts environnementaux non seulement en aval (opérations de collecte et de traitement des déchets), mais aussi en amont (production, transformation, transport et utilisation des matières) (ADEME 2016f).

Pour prendre en compte le plus large spectre de possibilités de traitement des déchets dans le cadre de la hiérarchie précédente, nous considérons les voies de traitement telles que détaillées au paragraphe suivant et synthétisées à la figure 14.

3.4.2.3. Les voies de valorisation des déchets

L'objectif principal des opérations de traitement des déchets est de les valoriser au mieux (c.-à-d. de préserver leur valeur, ou au moins de limiter la perte de valeur ; voir § 2.2) pour limiter la quantité de déchets ultimes. L'article L.541-1-1 du code de l'environnement définit ainsi la *valorisation* comme toute opération dont le résultat principal est que les déchets servent à des fins utiles en substitution à d'autres substances, matières ou produits, qui auraient été utilisés à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, y compris par le producteur de déchets. (« Code de l'environnement | Legifrance » s. d.). Il existe donc cinq voies de valorisation :

- la valorisation *fonctionnelle* qui consiste à préserver la valeur ajoutée fonctionnelle (totale ou partielle) du produit (voir § 3.4.2.3.1). Les voies de traitement associées sont la réutilisation, la remise à neuf ou la montée en gamme (valorisation fonctionnelle totale), et le reconditionnement ou la réaffectation (valorisation partielle) ;
- la valorisation *matière* qui vise à préserver la valeur propre des constituants (matériaux et substances) du produit (§ 3.4.2.3.2). Les voies de traitement associées sont d'abord le recyclage, mais aussi la conversion des déchets en combustibles, le remblaiement, etc. ;
- la valorisation *énergétique* qui consiste à utiliser la chaleur générée par la combustion des déchets pour produire de l'énergie (§ 3.4.2.3.3). Les voies de traitement associées sont l'incinération avec récupération d'énergie et la méthanisation ;
- l'*élimination* qui consiste à traiter les déchets qui n'ont pas pu être valorisés (§ 3.4.2.3.4). Les voies de traitement associées sont l'incinération sans valorisation énergétique et le stockage. Ces deux voies de traitement constituent une perte de valeur définitive ;
- et l'*entreposage* dont la fonction principale est de stocker les déchets dont la valorisation pourrait être intéressante à terme, mais qui n'est pas à ce jour économiquement ou techniquement viable. Il n'y a pas donc de perte de valeur car les déchets restent en attente de traitement (§ 3.4.2.3.5).

3.4.2.3.1. Valorisation fonctionnelle

3.4.2.3.1.1. La réutilisation

La *réutilisation* (ou *réusage*) est une opération par laquelle des substances, matériaux ou produits devenus des déchets sont utilisés de nouveau (« Code de l'environnement | Legifrance » s. d.). Elle se distingue ainsi clairement du *réemploi* (qui supposent qu'ils sont utilisés à isofonction ; voir § 3.3.5.4). Elle permet donc d'éviter la fabrication d'un produit ou d'une substance neufs à partir de matériaux de première extraction. Néanmoins, cette opération ne doit pas avoir plus d'impact qu'en auraient le produit ou la substance (et leur production) auquel la réutilisation se substitue. (Ministère de la Transition écologique et solidaire 2017)

La réutilisation prérequiert la *préparation des déchets en vue de leur réutilisation*. Ceci englobe toutes les opérations de contrôle, nettoyage ou réparation : les produits, composants ou substances devenus des déchets sont ainsi préparés pour être réutilisés sans autre opération de prétraitement. (« Code de l'environnement | Legifrance » s. d.)

Les processus permettant d'assurer la réutilisation sont listés ci-dessous. Ils pourront toutefois être complétés par des opérations de mise à niveau (voir § 3.3.5.3) ou autres.

3.4.2.3.1.2. La remise à neuf

La remise à neuf (ou *refurbishment*) est le procédé de restauration des composants à un état fonctionnel

satisfaisant les spécifications d'origine. Ces corrections restent toutefois le plus souvent esthétiques (p. ex. resurfaçage, changement de carter, etc.).

3.4.2.3.1.3. Le reconditionnement

Le reconditionnement (ou *remanufacturing*, ou parfois réusinage par traduction littérale) est une opération assez proche de la remise à neuf, mais pour laquelle les corrections sont plus profondes. Il consiste en la reconstruction du produit dans le respect des spécifications qui étaient les siennes en sortant d'usine. Le produit reconditionné (ou *remanufacturé*) doit en effet atteindre une qualité au moins égale à celle d'un produit neuf. Le produit sortant est la combinaison de pièces réutilisées, réparées (remises à neuf) et neuves.

3.4.2.3.1.4. La montée en gamme

La montée en gamme (ou *upgrading*) implique généralement le remplacement d'un constituant (module, pièce ou plus généralement composant physique) ou d'un logiciel par une version plus récente ou meilleure, afin de mettre à jour le système et/ou d'améliorer ses caractéristiques.

3.4.2.3.1.5. La réaffectation

La réaffectation (ou *repurposing*) consiste en l'identification d'un nouvel usage pour un produit qui ne peut plus être utilisé sous sa forme originale, mais qui a le potentiel d'intégrer une stratégie hybride de réutilisation ou de recyclage en fin de vie lorsque la réutilisation directe n'est pas économiquement ou techniquement possible (Coughlan, Fitzpatrick, et McMahon 2018). Par exemple, certaines batteries de véhicules électriques conservent en fin de vie 70 à 80 % de leur capacité initiale ; elles peuvent être réaffectées pour être utilisées pour le stockage d'énergie stationnaire.

3.4.2.3.2. Valorisation matière

La valorisation dite *matière* joue un rôle essentiel pour lutter contre les impacts environnementaux liés à la production et à l'élimination des déchets, et gérer durablement les ressources naturelles. Elle permet également de limiter l'émission de gaz à effet de serre et la consommation d'eaux liées à la production industrielle (Ministère de la Transition écologique et solidaire 2017). Plusieurs formes de valorisation matière coexistent.

3.4.2.3.2.1. Le recyclage

Le *recyclage* désigne 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. (« Code de l'environnement | Legifrance » s. d.)

Deux opérations de recyclage sont identifiées :

- la *régénération* est basée sur des procédés de raffinage d'un fluide ou d'un solide, impliquant l'extraction de la fraction polluante ou indésirable contenue dans le déchet. (France, Commissariat général au développement durable, et Service de l'économie 2012). La régénération peut concerner les huiles, les solvants, les gaz fluorés, les plastiques, les catalyseurs, etc., et peut s'opérer par filtration, déshydratation sous vide, raffinage, etc. (ADEME s. d.) ;

- le *compostage* est un procédé de transformation aérobie (c.-à-d. en présence d'oxygène) permettant de valoriser les matières organiques en compost (ADEME 2015f). Les biodéchets (déchets naturels biodégradables) sont introduits dans un composteur pour une fermentation aérobie. (Afnor 2002; 2006, 44-051; Ministère de la Transition écologique et solidaire 2017)

Les opérations de valorisation énergétique des déchets (voir § 3.4.2.3.3), celles relatives à la conversion des déchets en combustible (§ 3.4.2.3.2.2.1) et les opérations de remblaiement (§ 3.4.2.3.2.2.2) ne peuvent pas être qualifiées d'opération de recyclage. (« Code de l'environnement | Legifrance » s. d.)

3.4.2.3.2.2. Les autres voies de valorisation dite *matière*

La transformation dite *matière* (ou transformation de la matière) désigne toute opération de valorisation conduisant à la conversion des déchets en combustible, ou à toute opération de remblaiement.

3.4.2.3.2.2.1. Conversion des déchets en combustibles

Les combustibles solides de récupération (CSR) sont des combustibles de substitution dérivés des déchets non dangereux utilisés pour leur haut pouvoir calorifique à des fins de valorisation énergétique en substitution des combustibles fossiles classiques (coke, fuel, etc.).

Les déchets utilisés pour fabriquer du CSR sont des déchets industriels banals (DIB) et des encombrants de déchetteries de qualité hétérogène ou trop volumineux pour être valorisés dans les unités de valorisation énergétique (incinération et co-incinération). (ADEME s. d.; SITA 2016) Le processus permet aussi de valoriser les refus de tri des déchets. Néanmoins, la production de CSR ne doit pas se faire au détriment de la prévention de la production de déchets et du recyclage (voir § 3.4.2.3.2.1). Les déchets identifiés comme gisements de polluants à risques (p. ex. PVC comme précurseurs de dioxines, accumulateurs en raison de la présence de mercure, etc.) doivent donc être particulièrement surveillés et devront être extraits si nécessaire. Des critères de pouvoir calorifique inférieur (PCI), de composition chimique (p. ex. mercure, halogènes, etc.) et de propriétés physiques (p. ex. humidité, granulométrie, etc.) doivent être respectés. (Ministère de la Transition écologique et solidaire 2017)

3.4.2.3.2.2.2. Remblaiement

Le remblaiement de carrières est réalisé avec un apport de matériaux extérieurs (p. ex. déblais de terrassement, matériaux de démolition, etc.) nécessitant un tri préalable pour garantir l'utilisation des seuls matériaux inertes. (ADEME, s. d.)

3.4.2.3.3. Valorisation énergétique

La valorisation énergétique est un mode de traitement à réserver aux déchets ne pouvant faire l'objet d'aucune réutilisation ou de recyclage.

3.4.2.3.3.1. Incinération avec récupération d'énergie

La récupération d'énergie désigne l'utilisation des déchets combustibles comme un moyen de génération d'énergie par incinération directe avec ou sans autres déchets mais avec récupération de la chaleur (Parlement

Européen & Conseil de l'Union Européenne, 2005).

Un incinérateur de déchets non dangereux réalise alors une opération de valorisation énergétique si cette opération respecte les conditions définies à l'article 33-2 de l'arrête du 20 septembre 2002 (Commissariat général au développement durable et Service de l'économie 2012)

3.4.2.3.3.2. La méthanisation

La méthanisation consiste en la dégradation anaérobie de biodéchets. Le biogaz (mélange gazeux composé en majorité de méthane et de dioxyde de carbone) ainsi généré permettra la production d'énergie. (Ministère de la Transition écologique et solidaire 2017)

Toute matière organique est ainsi susceptible d'être décomposée par méthanisation. Ce peut être par exemple des déchets organiques d'origine agricole, agro-industrielle ou municipale (notamment pour les biodéchets). Le procédé permet en particulier de traiter des déchets organiques gras ou très humides, non compostables en l'état. La méthanisation reste néanmoins peu adaptée aux composés très stables comme la lignine, qui peut en revanche être facilement compostée (voir § 3.4.2.3.2.1).

La matière organique initialement contenue dans les déchets est transformée en un produit humide, partiellement stabilisé, appelé digestat. Ce coproduit fertilisant peut être épandu sur des terres agricoles sous réserve de respecter la réglementation du code rural (Legifrance s. d.).

3.4.2.3.4. Élimination

L'élimination consiste en toute opération qui n'est pas de la valorisation, même lorsque ladite opération a comme conséquence secondaire la récupération de substances, matières ou produits, ou d'énergie. (« Code de l'environnement | Legifrance » s. d.)

L'élimination est le mode de traitement des déchets à éviter. Il doit être réservé aux déchets *ultimes* pour lesquels aucune autre valorisation n'est possible. La loi de transition énergétique pour la croissance verte a fixé un objectif de réduction de l'élimination par stockage de 30 % en 2020 et 50 % en 2025, des quantités admises en décharge en 2010 (Assemblée Nationale et Sénat 2015). L'encadrement de cette réduction sera notamment réalisé à travers les plans régionaux de prévention et de gestion des déchets. (Ministère de la Transition écologique et solidaire 2017)

3.4.2.3.4.1. Incinération sans valorisation énergétique

L'incinération de déchets sans qu'une valorisation énergétique ne soit pratiquée, ou pour laquelle la valorisation énergétique ne présente pas suffisamment de rendement, se réduit à une opération d'élimination.

3.4.2.3.4.2. Stockage (mise en décharge, enfouissement)

Le stockage est la dernière opération possible dans la gestion des déchets. Il concerne la fraction des déchets qui ne peut être valorisée sous forme de matière ou d'énergie dans les conditions techniques et économiques du moment. Il existe trois types d'installation de stockage (ADEME 2019b) :

- les installations de stockage de déchets dangereux (dont le stockage est soumis à certaines conditions comme des équipements spéciaux ou des systèmes d'étanchéité) ;
- les installations de stockage de déchets inertes ;

- les installations de stockage de déchets non dangereux.

En raison de son faible coût, le stockage a longtemps été le mode de traitement privilégié des déchets. Les enjeux de la protection environnementale associés à l'exploitation des décharges, et la hausse progressive de la fiscalité liée à l'exploitation (TGAP : taxe générale sur les activités polluantes), ont conjointement conduit au renchérissement des coûts d'exploitation des décharges. En outre, ces installations requièrent en général une emprise foncière non négligeable dont l'immobilisation se prolonge au minimum trente ans après l'arrêt de la réception des déchets, pour les déchets non inertes (dangereux ou non).

3.4.2.3.5. Entreposage

L'entreposage est une étape importante dans la chaîne logistique. Dans le cadre de la gestion des déchets, cette opération consiste à stocker certains produits ou composants dans des entrepôts dans l'attente d'une solution commerciale viable (p. ex. écrans LCD, avions, etc.).

4. Conclusions

4.1. Cycle de vie du produit.

Synthèse

Dans ce chapitre, le cycle de vie du produit a été défini, et divisé en trois grandes phases : sa conception, sa vie et sa fin de vie. La figure 13 propose une vue d'ensemble du cycle de vie du produit.

Notons que sur cette figure, les trois phases sont liées, voire imbriquées en considérant les liens assurant la circularité. Cependant, il ne faut pas oublier que bien que les phases de vie et de fin de vie sont caractérisées par la présence de constituants matériels, la phase de conception n'en compte que lorsque les premiers prototypes sont construits.

Il a été évoqué que les voies de valorisation en fin de vie ainsi que les différentes voies de traitement associées à chaque voie suivent une logique de traitements hiérarchisés, conditionnée dans une optique d'économie circulaire par la préservation de valeur. L'objectif de ce modèle économique consiste bien à « fermer la boucle » (voir figure 13).

La figure 14 propose une vue d'ensemble des voies de traitement en fin de vie.

Il faut bien noter la nuance sémantique entre *voie de valorisation* et *voie de traitement*. La première décrit une approche globale, articulée sur les différents niveaux de préservation de la valeur du produit (c.-à-d. fonctionnelle, matière, énergétique et l'élimination), de la plus favorable à la moins souhaitable (voir figure 14) ; l'entreposage peut y être vu comme une mise en attente de traitement. La deuxième correspond aux modes de traitements possibles pour chaque voie de valorisation, qu'ils concernent ou non l'intégralité du produit.

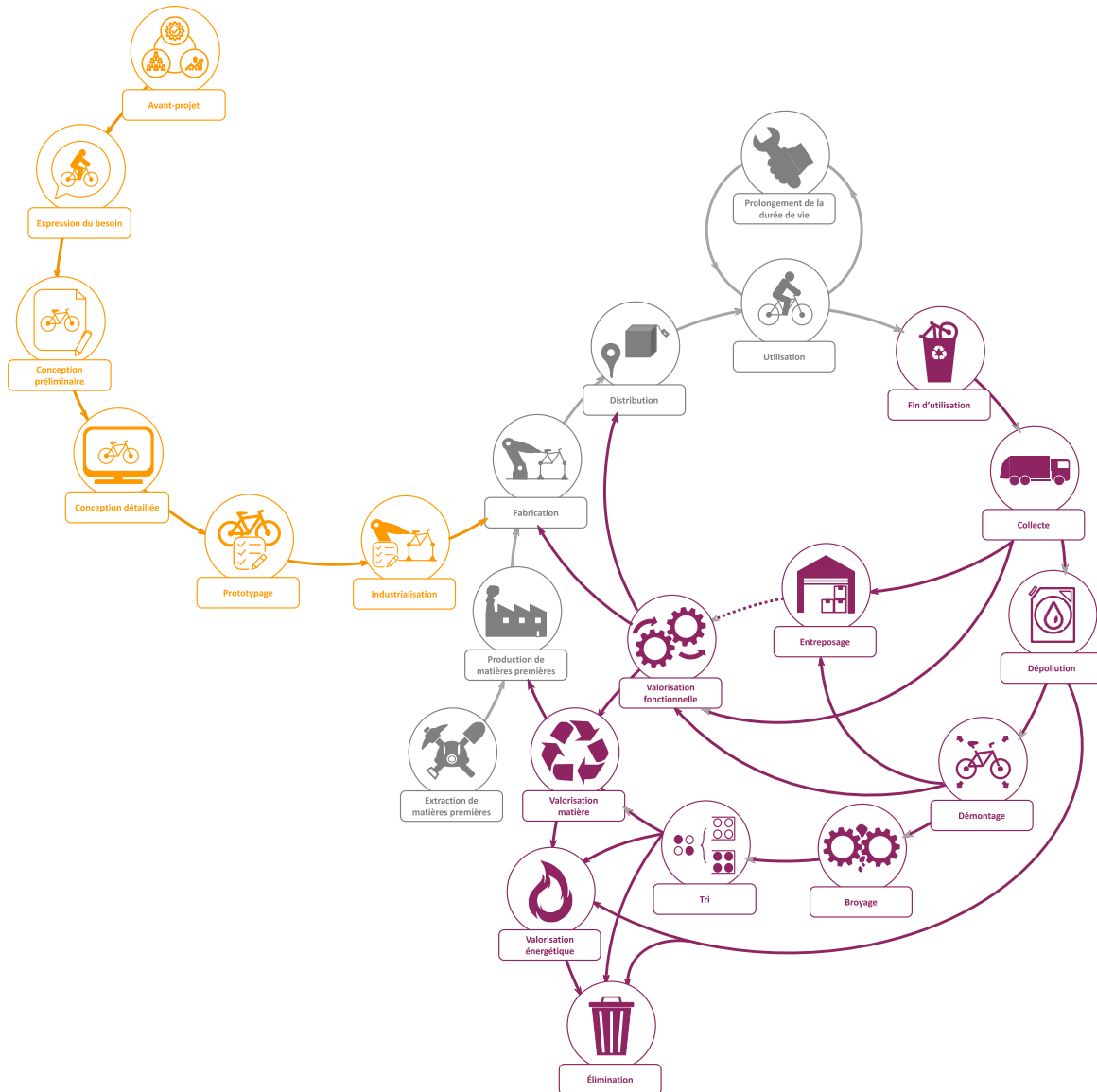


Figure 13. Représentation synoptique du cycle de vie du produit

En outre, il faut aussi distinguer la *voie de traitement en fin de vie* du *scénario de fin de vie*. En effet, le scénario décrit l'ensemble des opérations de traitement à réaliser pour un produit ou ses constituants dans un contexte géographique et temporel donné. Les scénarios cherchent aussi bien à représenter la réalité que des situations hypothétiques (p. ex. les meilleures technologies de traitement ou les pires) et peuvent ainsi être définis à partir d'éléments réels ou d'hypothèses.

4.2. Note sur la limite sémantique du terme *produit*.

Notion d'artéfact

Dans ce chapitre, le terme *produit* désigne de façon générale tout objet physique conçu ou fabriqué par l'homme.

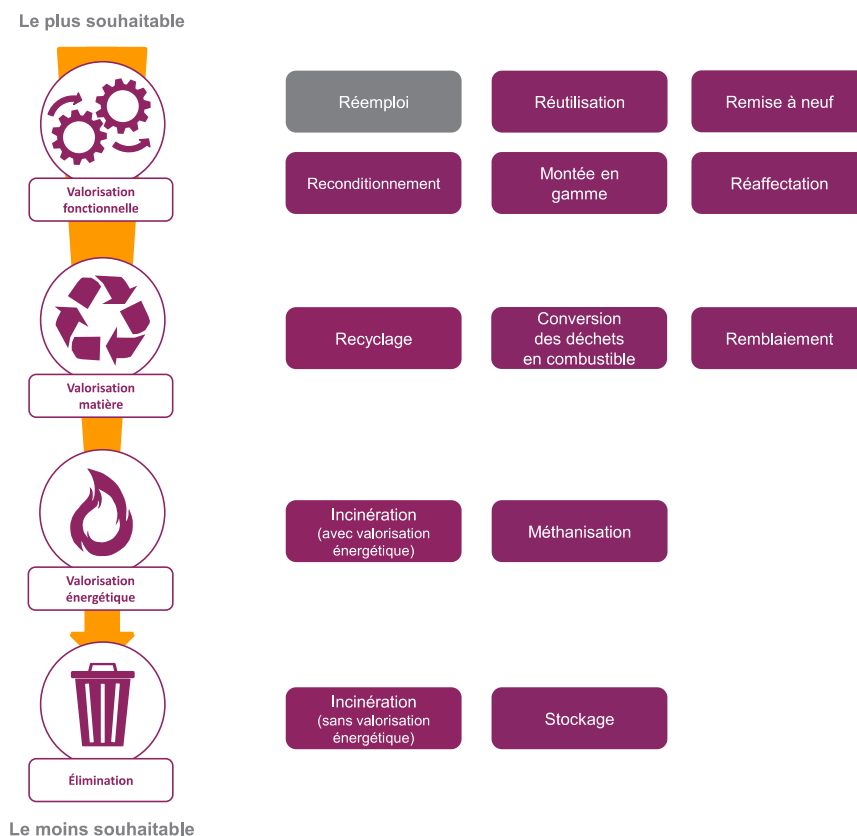


Figure 14. Hiérarchisation des voies de traitement en fin de vie

Un *produit* désigne également l'objet acheté par le consommateur pour répondre à un besoin. Dans ce deuxième cas, le produit (système complexe) est donc l'aboutissement de tout le cycle de développement (c.-à-d. du processus de conception jusqu'à sa fabrication) ; il se décompose au sens de sa structure fonctionnelle en modules (ensemble de pièces ou mécanisme répondant à une fonction), pièce élémentaires, etc.

Selon ce que le concepteur, le producteur, le fabricant, etc. considère, c'est-à-dire selon l'échelle dimensionnelle ou temporelle à laquelle il travaille, le terme *produit* peut tout aussi bien désigner le système complet qu'un de ses composants. Le terme peut donc se révéler ambigu.

Dans la suite de ce document, nous choisissons donc de définir le produit par sa deuxième acception (c.-à-d. l'ensemble complexe aboutissement du processus de conception) au sens où le consommateur ou l'acheteur l'entend généralement. Toutefois du point de vue du concepteur, et en vue de simplifier l'analyse en proposant une approche systématique, un terme plus général est nécessaire pour désigner tout objet, matière ou substance, *produit* par l'homme.

Formé sur le latin *ars, artis* (art) et le participe passé de *facere* (faire), puis emprunté à l'anglais *artéfact*, le terme *artéfact* (ou *artéfact*) désigne, dans l'une de ses nombreuses acceptions, « ce qui est réalisé par l'homme, un produit artificiel ». C'est donc « un produit [...] de l'industrie », autrement dit un produit *manufacturé*. L'*artéfact* désigne enfin tout produit ayant subi une transformation *même minime* par l'homme (ce qui le distingue alors de tout autre généré par un phénomène naturel). (TLFi s. d.)

La définition du *produit matériel* telle que présentée au paragraphe précédent (NF ISO 14040-2006) intègre donc parfaitement celle de l'artéfact.

Par conséquent dans le cadre de cette étude, nous serons parfois amenés à préférer le terme *artéfact* au mot *produit*. Cette nuance sémantique devrait en effet nous permettre de mener une grande partie de l'analyse indépendamment de sa nature précise, et en s'affranchissant ainsi souvent de l'échelle d'étude ou de sa temporalité. En effet selon le degré de précision choisi, évaluer les impacts de l'artéfact tout au long de sa vie et au cours des traitements en fin de vie sera d'autant plus difficile que sa structure ou sa composition seront complexes. Plus un composant contient de sous parties, plus le nombre de facteurs à prendre en compte pour évaluer l'impact de sa fin de vie sera important.

L'artéfact pourra ainsi désigner :

- un produit complet ;
- un module ou une unité (c.-à-d. un sous-ensemble de produit) ;
- une pièce élémentaire (c.-à-d. un sous-ensemble de module), soit potentiellement :
 - une pièce multimatériau (p. ex. un composite, un mélange architecturé de polymères non miscibles, etc.) ;
 - ou une pièce homogène (p. ex. un monomatériau, un alliage métallique, etc.) ;
- un semi-produit (p. ex. préimprégné) ;
- une matière première ou un matériau élémentaire (p. ex. granulés de plastiques, fibres de carbone, etc.) ;
- ou toute chute ou rebut d'un procédé de fabrication ;

tant que les propriétés à considérer seront évaluables globalement, à l'échelle de l'artéfact. Toutefois, tous ces termes pourront être utilisés si le composant étudié est clairement spécifié ou si l'échelle d'analyse et le moment où elle est effectuée sont précisément définis. Le terme *produit* désignera alors, dans la suite de ce rapport, un artéfact particulier, plutôt assimilé à un système complexe (multi-modules).

4.3. Amorce de la problématique

Au cours de ce chapitre le cycle de vie du produit a été défini exhaustivement et son importance dans l'économie circulaire a été mise en évidence.

Le chapitre suivant a pour objectif de présenter le contexte de la thèse et d'identifier les problématiques à résoudre (du point de vue du concepteur) pour pouvoir intégrer pleinement l'économie circulaire comme modèle économique, dès la conception du produit. À ce sujet, un état des lieux de la fin de vie et la gestion des déchets sera d'une part dressé, et des démarches de conception pour la fin de vie seront identifiées d'autre part.

Chapitre 2

Contexte et problématique

Résumé Modèle économique dominant, le capitalisme a engendré nombre de problématiques environnementales, en raison notamment des modes de production et de consommation associés. Après avoir dressé un rapide état des lieux des conséquences induites, les actions menées pour y faire face sont étudiées.

La mise en œuvre des filières de traitement des produits en fin de vie (c.-à-d. des déchets) est une première réponse évidente. Le concept de *filière* est d'abord défini. Les différentes méthodes d'évaluation de sa performance sont ensuite comparées. Enfin, un état des lieux des filières REP françaises est dressé.

Une seconde piste de solution consiste à prévenir la génération des déchets ; elle s'appuie sur la conception optimisée du produit pilotée par sa fin de vie. Dans ce cadre, les démarches de conception pour X (et plus précisément la conception pour la fin de vie et l'écoconception) sont introduites. Deux types d'évaluation du produit en conception sont ensuite analysés : (i) sa performance potentielle de valorisation (c.-à-d. sa valorisabilité), et (ii) les impacts environnementaux tout au long de son cycle de vie.

Enfin, la problématique de notre recherche est formulée à partir des manques et besoins identifiés lors de l'état de lieux de la mise en œuvre des politiques de gestion des déchets et d'économie circulaire : comment créer un lien direct et bijectif entre le concepteur d'un produit et les acteurs de la filière en charge de son traitement en fin de vie ? Comment pérenniser cet échange d'informations entre acteurs ?

Table des matières du Chapitre 2

1. Introduction	87
2. Transition d'une croissance basée sur le capitalisme à un modèle de développement durable.....	88
2.1. Économie. Notion d'économie circulaire	88
2.2. Logistique Les nouveaux modes de chaîne d'approvisionnement	89
2.2.1. D'une vision linéaire.....	89
2.2.2. ... à une vision bouclée	89
2.2.2.1. La logistique inverse.....	89
2.2.2.2. La chaîne d'approvisionnement en boucle fermée	90
2.2.2.3. La chaîne d'approvisionnement verte	90
2.2.2.4. La chaîne d'approvisionnement durable	90
2.2.3. Synthèse des modes de chaîne d'approvisionnement.....	90
2.2.4. Limites de nouveaux modes de chaîne d'approvisionnement.....	91
2.3. Législation Réglementations encadrant la gestion de déchets	91
2.3.1. Exigences législatives.....	91
2.3.2. Axes clés ciblés par la législation pour résoudre les problématiques de gestion des déchets.....	92
3. Mise en œuvre de la politique de gestion de déchets et d'économie circulaire	95
3.1. Premier axe de la politique de gestion des déchets : favoriser la valorisation des produits en fin de vie (déchets) par la mise en place des filières de traitement	95
3.1.1. Notion de filière.....	95
3.1.1.1. Définitions.....	95
3.1.1.2. Caractérisation d'une filière	97
3.1.2. Évaluer la performance de valorisation d'une filière de traitement	102
3.1.2.1. Notions de performance et performance de valorisation (d'une filière de traitement).....	102
3.1.2.2. Méthodes d'évaluation de la performance de valorisation d'une filière de traitement.....	104
3.1.2.3. État de lieux de la performance de filières REP en France	108
3.2. Second axe de la politique de gestion des déchets : prévenir la génération des déchets à partir d'une meilleure conception du produit en vue de son traitement en fin de vie	114
3.2.1. Conception pour X.....	114
3.2.1.1. X?	114
3.2.1.2. Conception pour la fin de vie	115
3.2.1.3. Conception pour l'environnement : l'écoconception	115
3.2.2. Évaluer la performance potentielle de valorisation d'un produit en conception	118
3.2.2.1. Notion de valorisabilité d'un produit	118
3.2.2.2. Méthodes de référence pour l'évaluation de la valorisabilité d'un produit	119
3.2.2.3. Corrélation entre valorisabilité et valorisation. État des lieux.....	120
3.2.3. Évaluer les impacts environnementaux d'un produit	122
3.2.3.1. Notions d'impact environnemental et d'analyse du cycle de vie	122
3.2.3.2. Méthodes d'évaluation de référence des impacts du cycle de vie d'un produit	123
3.2.4. Développement d'outils de conception intégrant la notion de fin de vie.....	128
4. Synthèse.....	129
4.1. Problématique liée à l'évaluation en conception de la valorisabilité d'un produit.....	130

Chapitre 2

Contexte et problématique

4.2. Problématique liée à l'aide à la décision en conception131
4.3. Représentation synoptique de la problématiques de recherche132

Contexte et problématique

1. Introduction

Au XIX^e s., la révolution industrielle a fait basculer une société à dominante agraire et artisanale vers une société commerciale et industrielle, entraînant de grands bouleversements technologiques, économiques et sociaux. Ces transformations ont permis l'essor du capitalisme⁶ comme modèle économique dominant le monde.

Depuis la deuxième guerre mondiale, des éléments culturels et structurels ont conduit à une situation où la consommation, stimulée par des besoins induits, dépasse de loin le niveau des simples besoins élémentaires (Migone 2007). Ce mode de consommation hédoniste et industrialisé a induit des problèmes environnementaux importants comme la pollution, le réchauffement climatique, l'épuisement des ressources non renouvelables, la difficulté à éliminer les déchets ou le changement climatique.

C'est surtout au début des années 1970 qu'un intérêt général pour l'environnement s'est amorcé. En raison de l'augmentation rapide des dommages occasionnés à la planète, de plus en plus évidents et tangibles, beaucoup ont commencé à se soucier de la préservation de l'environnement. Les filières de traitement des déchets étaient alors peu développées. Le Club de Rome a publié en 1972 le rapport *Halte à la croissance ? (The Limits To Growth)* (Meadows et Club of Rome 1972). Ce rapport est la première grande étude soulignant les dangers écologiques de la croissance économique et démographique de la société de cette époque. Ce rapport concluait alors que *si l'augmentation actuelle de la population mondiale, l'industrialisation, la pollution, la production alimentaire et l'exploitation des ressources naturelles restaient identiques, les limites absolues de la croissance sur Terre seraient atteintes au cours des cent prochaines années.*

En 2015 lors de la COP21 à Paris, 195 pays ont adopté le tout premier accord universel sur le climat juridiquement contraignant. L'accord définit un plan d'action international visant éviter un changement climatique dangereux, en maintenant le réchauffement planétaire largement en dessous de 2°C (Commission

⁶ Système économique et social qui se caractérise par la propriété privée des moyens de production et d'échange et par la recherche du profit (TLFi s. d.).

Européenne 2016). Aujourd'hui, les préoccupations environnementales sont plus présentes que jamais car nous approchons d'un point de non-retour (Aengenheyster et al. 2018).

L'objectif de ce chapitre est de dresser un état de lieux des différentes actions mises en œuvre pour améliorer la gestion de déchets. Cette analyse permet d'identifier les manques et les besoins associés à cette gestion ainsi que de l'identification des verrous qui peuvent être levés dès la conception du produit. Fort de ce constat, les problématiques de notre recherche seront formulées en fin de chapitre.

2. Transition d'une croissance basée sur le capitalisme à un modèle de développement durable

Depuis la prise de conscience des années 1970, le modèle économique a dû être redéfini à travers le monde de façon à préserver les ressources naturelles et l'environnement.

En 1987, une nouvelle vision du développement économique et social émerge. La Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement publie *Notre avenir à tous (Our Common Future)* (Brundtland et al. 1987). Ce rapport confronte la politique de développement actuelle (marquée par la croissance économique mondialisée et l'accélération de la dégradation écologique à l'échelle mondiale) à celle du développement durable. Cette nouvelle notion de *développement durable* a été définie par la Commission comme *la pratique répondant aux besoins d'aujourd'hui sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins* (Brundtland et al. 1987).

Le développement durable est basé sur les trois piliers

- *environnemental*. Cette dimension cherche à maintenir l'intégrité écologique et l'équilibre des écosystèmes de la Terre, et à maintenir un rythme raisonné de consommation des ressources naturelles leur permettant de se renouveler ;
- *économique*. Il vise à ce que les communautés humaines soient d'une part en mesure de conserver leur indépendance et d'avoir accès aux ressources dont elles ont besoin, et d'autre part veiller à ce que les systèmes économiques soient préservés et que le travail soit accessible à tous ;
- et *social*. L'objectif est ici que les droits humains universels puissent être satisfaits, et que les ressources soient suffisantes pour assurer la santé et la sécurité de la communauté. Ce pilier souligne l'importance du rôle des dirigeants qui doivent assurer que les droits personnels, du travail et culturels soient respectés, et que chaque individu soit protégé contre tout type de discrimination.

(University of Alberta, s. d.)

Ce mode de développement s'est introduit dans plusieurs disciplines, notamment dans les domaines économique (voir § 2.1), logistique (§ 2.2) et législatif (§ 2.3).

2.1. Économie.

Notion d'économie circulaire

L'économie conventionnelle est communément qualifiée de *linéaire*. S'agissant par exemple d'un produit, des matières premières sont extraites et transformées, puis utilisées pour le fabriquer. Après avoir été utilisé, le produit est alors tout simplement éliminé. Par conséquent, sa matière (et a fortiori sa fonction, ou toute autre forme de valeur) est définitivement perdue lorsque le produit devient un déchet.

Par opposition, l'économie *circulaire* est fondée sur le principe de *refermer le cycle de vie des produits des services, des déchets, des matériaux, de l'eau et de l'énergie* (Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer s. d.). Par exemple, les matières issues des déchets peuvent être recyclées pour intégrer un nouveau produit et donc un nouveau cycle (devenant ainsi matières premières *secondaires*) pour limiter l'extraction des ressources naturelles (c.-à-d. des matières premières *primaires*). L'ADEME définit l'économie circulaire comme un système économique d'échange et de production qui, à tous les stades du cycle de vie des produits (biens et services), vise à augmenter l'efficacité de l'utilisation des ressources et à diminuer l'impact sur l'environnement tout en développant le bien-être des individus. (ADEME 2014a). Ce modèle repose donc bien sur les principes du développement durable rappelés précédemment.

2.2. Logistique

Les nouveaux modes de chaîne d'approvisionnement

Ce paragraphe présente comment la notion de gestion des déchets a été introduite dans le domaine de la logistique par la création de nouveaux modes de chaîne d'approvisionnement : les *filères de traitement des déchets*. Ces systèmes présentent de nombreuses similitudes avec les chaînes d'approvisionnement conventionnelles car elles sont toutes les deux des systèmes industriels chargés de la transformation d'un intrant en extrant.

2.2.1. D'une vision linéaire...

Jolliet *et al.* (Jolliet, Saadé, et Crettaz 2005) définissent la chaîne d'approvisionnement comme l'ensemble des processus en amont du site de production qui permettent la mise à disposition du produit ou du service considéré. Chopra et Meindl précisent que la chaîne d'approvisionnement ne comprend pas seulement les fabricants et producteurs de matières premières, mais aussi les acteurs du transport, du stockage, de la vente (en grandes et petites surfaces), voire aussi les clients (Chopra et Meindl 2008).

La chaîne d'approvisionnement *conventionnelle* peut ainsi être définie comme l'ensemble des processus et des acteurs impliqués dans la production et la distribution d'un bien. La gestion de cette chaîne d'approvisionnement regroupe l'ensemble des opérations de planification, de mise en œuvre et de contrôle permettant de la rendre aussi efficace que possible.

Ce mode de chaîne d'approvisionnement induit le caractère linéaire de la vie du produit précédemment évoqué : elle s'étend en effet de sa conception à son élimination, sans valorisation aucune en fin de vie. Ce mode est parfois qualifié de *cradle to grave* (du berceau à la tombe).

2.2.2. ... à une vision bouclée

Depuis qu'il est devenu essentiel de gérer des quantités de déchets croissantes, et plus généralement la fin de vie des produits, de nouveaux modes de chaîne d'approvisionnement cherchant à les valoriser ont été développés. En effet, la chaîne d'approvisionnement conventionnelle ne prend pas systématiquement en compte ces aspects, ni ceux liés à l'environnement et à l'économie circulaire.

2.2.2.1. La logistique inverse

Rogers et Tibben-Lembke définissent la *logistique inverse* comme le processus de planification, de mise en

œuvre et de contrôle de flux efficaces et rentables de matières, de produits et d'informations, allant du consommateur au fabricant⁷, pour récupérer de la valeur ou assurer l'élimination correcte des déchets (Rogers et Tibben-Lembke 1998). La gestion de cette chaîne consiste à optimiser les flux du consommateur (autrement dit de *l'origine du déchet*) vers les acteurs de la valorisation, pour générer enfin de nouveaux flux de produits reconditionnés, de pièces de rechange ou d'occasion, de matières premières de deuxième génération, à destination du fabricant (puis de nouveau vers le consommateur, etc.).

2.2.2.2. La chaîne d'approvisionnement en boucle fermée

La chaîne d'approvisionnement *en boucle fermée* regroupe à la fois la logistique de la chaîne d'approvisionnement conventionnelle et la logistique inverse. La boucle fermée implique que les déchets sont valorisés et utilisés pour la fabrication d'un nouveau produit. La vie du produit s'exprime ainsi dans une optique *cradle to cradle* (du berceau au berceau).

La gestion de cette chaîne implique la conception et le contrôle du système. L'objectif est de maximiser la création de la valeur tout au long du cycle de vie du produit avec récupération dynamique de cette valeur à partir des différents types et volumes d'intrants au fil du temps (Guide et Van Wassenhove 2009).

2.2.2.3. La chaîne d'approvisionnement verte

La chaîne d'approvisionnement *verte* regroupe la logistique de la chaîne d'approvisionnement conventionnelle et la gestion du produit en fin de vie, en intégrant en plus les aspects environnementaux (qui justifient le qualificatif de la chaîne).

Les aspects écologiques tels que la réduction des matières dangereuses et l'utilisation plus efficace des ressources sont intégrés dans les pratiques interorganisationnelles, y compris dans la conception du produit, la sélection et l'approvisionnement en matériaux, les procédés de fabrication, la livraison du produit final aux utilisateurs, et la gestion du produit en fin de vie (Islam, Karia, et Mohamed Soliman 2017; Sarkis, Zhu, et Lai 2011; Srivastava 2007).

2.2.2.4. La chaîne d'approvisionnement durable

La chaîne d'approvisionnement durable comprend la logistique de la chaîne d'approvisionnement conventionnelle et la gestion du produit en fin de vie, tout en intégrant les piliers économique, environnemental et social.

Seuring et Müller précisent que l'administration de cette chaîne est centrée sur la gestion des matériaux, des flux d'informations et de capitaux, ainsi qu'à la coopération entre les acteurs de la chaîne, en prenant en compte les exigences (conformes à celles des trois piliers du développement durable) des clients et des parties prenantes (Seuring et Müller 2008).

2.2.3. Synthèse des modes de chaîne d'approvisionnement

La figure 15 propose une représentation de ces types alternatifs de chaîne d'approvisionnement, en soulignant ce qu'implique chaque mode de gestion et éléments qui y sont pris en compte.

⁷ C'est ce sens (du consommateur vers le fabricant) qui vaut à ce mode logistique d'être qualifié d'*inverse*.

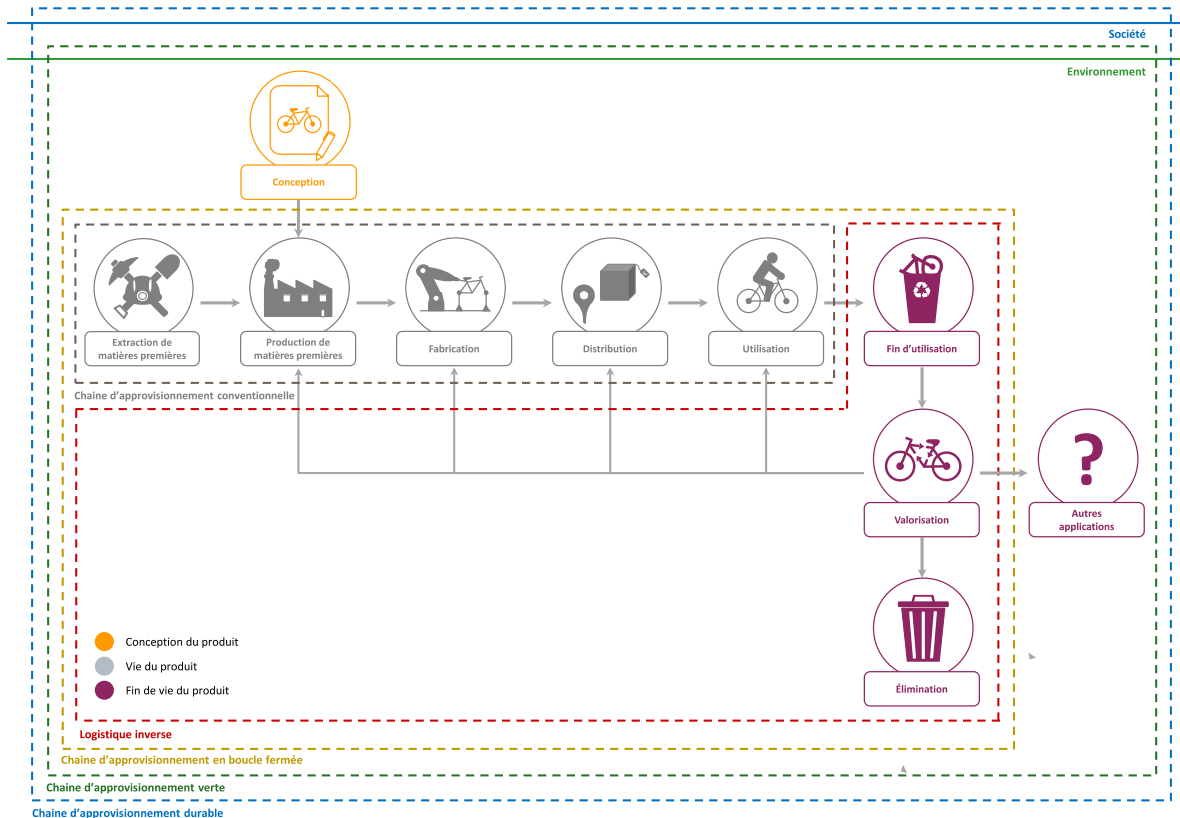


Figure 15. Représentation synoptique des différents types de chaîne d'approvisionnement

2.2.4. Limites de nouveaux modes de chaîne d'approvisionnement

Les filières de traitement des produits en fin de vie sont les systèmes industriels qui assurent leur gestion en retraitant la plus grande part possible, et en limitant ainsi leur incinération ou leur mise en décharge. Elles permettent enfin de réduire les impacts liés à l'extraction des matières premières.

Il existe de nombreux travaux visant à améliorer la performance ces systèmes (Govindan, Soleimani, et Kannan 2015; Sarkis, Zhu, et Lai 2011; Seuring et Müller 2008). Néanmoins, les filières de traitement ne sont ni complètement développées, ni suffisamment prises en compte par les chaînes d'approvisionnement industrielles traditionnelles. Le principal problème réside dans les variations en qualité et en quantité des flux de matière. Pour réussir à mieux intégrer les matières recyclées dans l'industrie (p. ex. pièces manufacturées produite avec 100 % de matière recyclée, ou au moins partiellement dans des produits de haute performance), il faut trouver une stabilité et une reproductibilité des processus de recyclage, et plus globalement de toutes les étapes de la filière de fin de vie.

2.3. Législation

Réglementations encadrant la gestion de déchets

2.3.1. Exigences législatives

Depuis le début des années 1970, des réglementations de plus en plus exigeantes et contraignantes ont été mises en place pour valoriser les déchets dans l'optique de l'économie circulaire (voir figure 16).

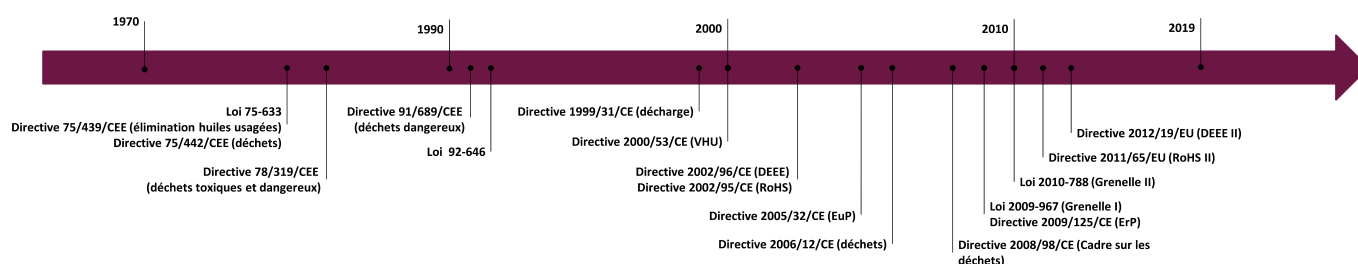


Figure 16. Représentation synoptique des principales directives environnementales ayant émergées depuis le début des années 1970

On distingue deux approches complémentaires dans ces règlements : les premiers sont centrés sur le *produit*, les seconds s'intéressent à l'*organisation* (c.-à-d. aux aspects organisationnels de la filière).

Dans l'*approche produit*, normes et textes législatifs visent à cadrer la prise en compte des questions liées aux impacts environnementaux dès la conception du produit pour réduire son impact environnemental tout au long de son cycle de vie et en particulier en fin de vie. Ces normes assurent aussi de recadrer et d'aider à faciliter la démarche de mise en œuvre, et précisent également certains aspects de la communication et de la déclaration environnementale. Par exemple, la Directive 2009/125/CE encadrant les exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2009) ou la Directive 2012/19/UE établissant une liste de substances dont l'utilisation est interdite ou très limitée dans la fabrication des équipements électriques et électroniques (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2012).

Dans l'*approche organisation*, les normes s'intéressent à l'aspect organisationnel au sens des systèmes industriels, de production, de distribution, etc. Elles se focalisent sur la manière dont ces entreprises gèrent les approches environnementales dans leur processus globaux. Par exemple, la Directive 1999/31/CE porte sur la mise en décharge des déchets (Conseil de l'Union Européenne 1999) et la Directive 2008/98/CE encadre la gestion des déchets (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2008).

Le tableau 2 rappelle quelques points clés de ses textes législatifs.

2.3.2. Axes clés ciblés par la législation pour résoudre les problématiques de gestion des déchets

La législation propose principalement de résoudre la problématique de la gestion des déchets suivant deux axes. Le premier consiste à mettre en place les filières de traitement des produits en fin de vie (pilotées par des objectifs de valorisation) pour mieux gérer les déchets. Le deuxième consiste à prévenir la génération de déchets en écoconcevant les produits pour prolonger d'abord leur durée de vie, et faciliter leur traitement lorsqu'ils seront en fin de vie, rejoignant ainsi la problématique du premier axe.

Règlement	Points clés du texte	Nature de l'approche	Référence	Textes antérieurs associés
Loi 75-633 du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux	- Définition légale du déchet ; - Définition d'un plan de protection de l'environnement et de la santé humaine ; - Plan de gestion des déchets.	Organisation (fin de vie)	(Président de la République et Assemblée nationale et Sénat 1975)	-
Loi 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement	- Définition du déchet ultime ; - Mise en avant de l'importance de la valorisation ; - Classement des installations d'élimination des déchets comme installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).	Organisation (fin de vie)	(Président de la République et Assemblée nationale et Sénat 1992)	-
Directive 1999/31/CE du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge des déchets	- Objectif de réduction des tonnages entrant en décharge : • <u>2016</u> 35 % des tonnages de 1995.	Organisation (fin de vie)	(Conseil de l'Union Européenne 1999)	-
Directive 2000/53/CE du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usage (Directive VHU)	- Promotion des politiques de prévention des déchets lors de phases de conception et de construction des véhicules ; - Mise en place d'un système de collecte des VHU ; - Conditions de traitement des VHU ; - Objectifs de réutilisation et de valorisation des VHU : • <u>2015</u> 85 % de réutilisation et recyclage, 95 % de réutilisation et de valorisation. - Obligations de communication des différents acteurs.	Produit (conception et fin de vie)	(Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2000)	-
Directive 2008/98/CE du 19 novembre 2008 relative aux déchets (Directive cadre sur les déchets)	- Hiérarchisation du traitement des déchets ; - Précisions sur les définitions de <i>déchet</i> , <i>valorisation</i> , <i>élimination</i> ; - Plan de gestion des déchets ; - Responsabilité élargie des producteurs de déchets (REP) ; - Échéanciers des programmes de prévention des déchets ; - Objectifs chiffrés pour le recyclage et le réemploi : • 50 % en masse pour les papiers, métaux, plastiques, verres dans les déchets ménagers et assimilés (DMA) ; • 70 % en masse pour les déchets de construction et démolition.	Organisation (fin de vie)	(Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2008)	Directive 75/439/CEE (<i>abrogée</i>) (Élimination des huiles usagées) Directive 91/689/CEE (<i>abrogée</i>) (Déchets dangereux) Directive 78/319/CEE (<i>abrogée</i>) (Déchets toxiques et dangereux) Directive 2006/12/CE (<i>abrogée</i>) (Déchets) Directive 75/442/CEE (<i>abrogée</i>) (Déchets)
Directive 2009/125/CE du 21 octobre 2009 établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie (Directive ErP)	- Exigences en matière d'écoconception applicables aux produits consommateurs d'énergie. La directive établit : • les paramètres d'écoconception des produits consommateurs d'énergie ; • les exigences concernant la fourniture d'informations ; • les exigences applicables au fabricant ; • et la mise sur le marché et/ou mise en service uniquement avec un marquage « CE » et la déclaration de conformité.	Produit (conception et distribution)	(Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2009)	Directive 2005/32/CE (<i>abrogée</i>) (Directive EuP)

Chapitre 2

Contexte et problématique

Règlement	Points clés du texte	Nature de l'approche	Référence	Textes antérieurs associés
Loi 2009-967 (Lois Grenelle I) Loi 2010-788 (Loi Grenelle II)	<ul style="list-style-type: none"> - Plans départementaux et locaux de prévention ; - Augmentation du recyclage (dont compostage) ; - Filières REP dont déchets d'emballages, DEEE, etc. ; - Compostage domestique, de proximité, méthanisation ; - « Gros producteurs » de biodéchets ; - Traitement mécano-biologique (TMB) ; - Objectifs de collecte pour recyclage : <ul style="list-style-type: none"> • 45 % des DMA ; • 75 % des déchets d'emballages) ; - Tarification incitative ; - Limitation à 60 % des tonnages incinérés et stockés ; - Réglementation sur les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), notamment pour les procédés biologiques) ; 	Organisation (fin de vie)	(Président de la République et Assemblée nationale et Sénat 2009; 2010)	
Directive 2011/65/UE (Directive DEEE II)	<ul style="list-style-type: none"> - Écoconception des DEEE, pour favoriser leur réemploi et leur traitement ; - Collecte sélective des DEEE, avec des objectifs de collecte progressifs et une obligation de reprise gratuite de l'ancien appareil lors de la vente d'un nouveau ; - Traitement systématique de certains composants et de substances dangereuses pour prévenir toute pollution ; - La réutilisation, le recyclage, la valorisation des DEEE collectés avec des objectifs de recyclage et de valorisation élevés. 	Produit (conception et fin de vie)	(Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2011)	Directive 2002/96/CE (<i>refonte</i>) (Directive DEEE)
Directive 2012/19/UE (Directive RoHS II)	<ul style="list-style-type: none"> - Liste de substances dont l'utilisation est interdite ou très limitée dans la fabrication des équipements. 	Produit (substances)	(Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2012)	Directive 2002/95/CE (<i>refonte</i>) (Directive RoHS)

Tableau 2. Principales directives environnementales.

Parmi ces réglementations, l'un des concepts le plus important est celui de responsabilité élargie du producteur (REP). Il a été promu par l'Organisation pour la Coopération et le Développement Économiques (OCDE) dans les années 1990. Il est basé sur le principe selon lequel le producteur d'un produit (c.-à-d. celui qui met le produit sur le marché) en est responsable tout au long de son cycle de vie, c'est-à-dire aussi en fin de vie lors de la gestion du déchet (ADEME 2016a), et notamment financièrement (ADEME 2015a). Les réglementations incitent ainsi les fabricants à s'engager dans des démarches d'écoconception en vue d'atténuer les impacts environnementaux. Ce concept est donc important car avant, les deux objectifs de la législation (décrits ci-dessus) étaient séparés et la REP a permis de les réunir.

La partie suivante présente un état des lieux de la mise en œuvre de la politique de gestion de déchets, centrée sur les deux axes clés ciblés par la législation

3. Mise en œuvre de la politique de gestion de déchets et d'économie circulaire

Il a été mis en évidence au paragraphe 2.3.2 que la législation privilégie principalement deux axes pour résoudre la problématique de gestion de déchets. Nous analysons à présent comment cette politique est mise en œuvre. Ainsi, la politique de valorisation des produits en fin de vie par le développement des filières de traitement est étudiée dans un premier temps (§ 3.1). La politique de prévention de la génération des déchets à partir d'une meilleure conception du produit vis-à-vis de son traitement en fin de vie sera analysée au paragraphe suivant (§ 3.2).

3.1. Premier axe de la politique de gestion des déchets : favoriser la valorisation des produits en fin de vie (déchets) par la mise en place des filières de traitement

Le premier axe ciblé par la législation pour résoudre la problématique de gestion de déchets est la mise en place des filières assurant leur traitement. L'objectif de ces systèmes est de valoriser au maximum les produits en fin de vie selon la hiérarchie de traitement établie par la norme 2008/98/CE (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2008) (voir Chapitre 1, § 3.4.2.2).

Ce paragraphe dresse un état des lieux de la mise en œuvre de cette politique européenne. À cette fin, la notion de filière de traitement est d'abord définie. La façon dont ces systèmes sont évalués est ensuite étudiée. Enfin, un état des lieux des filières REP en France est présenté.

3.1.1. Notion de filière

3.1.1.1. Définitions

3.1.1.1.1. Filière de recyclage

Notons que conformément à ce qui a été rappelé dans le chapitre 1 (§ 3.4.2.3.2), le recyclage n'est évidemment pas l'unique voie de valorisation, mais la plus fréquemment envisagée s'agissant du traitement des déchets. C'est pourquoi nous choisissons de débiter cette analyse par les filières dites de recyclage. En effet, l'expression *filière de recyclage* est la plus fréquemment utilisée en France pour désigner la *filière en*

charge du traitement des produits en fin de vie. Néanmoins, certains auteurs préfèrent parler de *réseau de recyclage*, *système de recyclage*, *industrie de recyclage*, *processus de recyclage* ou *chaîne de recyclage* qui lui sont strictement équivalents.

Sans en proposer une définition formelle, la plupart des auteurs se contentent de définir le recyclage comme une série de procédés (Chancerel et Rotter 2009; Schaik et Reuter 2004). Dans la même logique mais dans le contexte spécifique des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), Hagelüken (Hagelüken 2006; Hagelüken 2006) précise que *la filière est composée des différents étapes consécutives que sont la collecte, le démontage, le broyage et/ou le prétraitement et le retraitement des différents matériaux et métaux. Ces étapes sont liées, et ces interdépendances sont cruciales*. Cette définition met l'accent sur l'importance des synergies entre acteurs d'une part, et procédés d'autre part.

D'après Maudet-Charbuillet (Maudet-Charbuillet 2009), tous les éléments ayant une influence sur le système doivent être identifiés. Elle précise ainsi que les filières de valorisation (y compris celles de recyclage) sont des systèmes complexes et leur fonctionnement dépend à la fois de caractéristiques internes et de facteurs externes. Il est donc important de prendre en considération tous ces éléments au moment de définir ce qu'est une filière de valorisation.

Rosu et Tilloy (Rosu et Tilloy 2013) proposent une définition plus complète : *[Une filière de recyclage implique] l'ensemble des acteurs internes et externes aux procédés de transformation de déchets en matière première recyclée, et leurs échanges de matière, de capitaux et de connaissances, en respectant la législation, pour limiter l'impact du prélèvement de matière vierge sur l'environnement*. Cependant, même si cette définition est beaucoup plus complète que les autres, elle laisse supposer que la motivation principale du recyclage est la réduction de l'extraction des matières premières, ce qui n'est généralement pas le cas. En outre, elle implique aussi que les parties prenantes échangent des connaissances sur leur propre savoir-faire, leurs compétences, etc. plutôt que des informations sur les composants qu'elles traitent (c.-à-d. les spécifications du produit et ses propriétés, des indicateurs de performance, etc.).

En s'appuyant sur les définitions précédemment citées, la définition suivante a été proposée (Martínez Leal et al. 2016) : *Une filière de recyclage est un système industriel distribué, dont le champ d'action est délimité par la législation, qui vise à préserver la valeur de la matière tout en réduisant les impacts liés à l'extraction des matières premières et la quantité de déchets incinérés ou mis en décharge. Ce système intègre d'une part l'ensemble des procédés et des acteurs (internes et externes à la filière) ayant en charge la transformation des déchets en matière recyclée, et d'autre part tous les échanges de matière, de capitaux et d'informations*.

Cette dernière définition met d'abord l'accent sur le fait qu'une filière de recyclage est un système industriel ; elle doit en effet être considérée comme tel pour devenir compétitive et atteindre une stabilité économique. Par ailleurs, elle précise la nature des intérêts motivant le recyclage. Enfin, elle intègre l'ensemble des éléments constituant la filière.

3.1.1.1.2. Filière de traitement des déchets

La définition retenue de la filière de recyclage sert de base à la définition plus large de la *filière de traitement des produits en fin de vie*. Cette nuance est importante : la *filière de traitement* sera ainsi préférée à celle de *recyclage* car elle englobe toutes les voies de valorisation envisageables : fonctionnelle, matière (donc le recyclage) et énergétique, ainsi que l'élimination.

Ainsi, une filière de traitement est le système industriel distribué, dont le champ d'action est délimité par la législation, qui vise à :

- préserver la valeur

- ajoutée du produit ;
 - fonctionnelle de tout ou partie du produit (p. ex. module, sous-ensemble fonctionnel, etc.) ;
 - matière de chacun de ses composants (module, pièce, etc.) ;
- réduire l'impact de l'extraction des matières premières ainsi que la quantité de déchets incinérés ou mis en décharge ;
- et d'éliminer correctement ce qui n'a pas pu être valorisé.

Ce système intègre d'une part, tous les processus de traitement et les acteurs (internes et externes à la filière) responsables de la préservation de la valeur fonctionnelle et matière du produit, et d'autre part, tous les échanges de matière, de capitaux et d'informations.

3.1.1.2. Caractérisation d'une filière

Les filières de traitement des produits en fin de vie ou plus généralement des déchets, existent depuis de nombreuses années. Cependant on manque toujours de connaissances fondamentales sur ces systèmes complexes. Toute proposition d'amélioration suppose d'en connaître la structure et le fonctionnement ; son comportement dépend de facteurs internes (liés aux caractéristiques propres de la filière), mais aussi de différents facteurs externes. Une définition détaillée et une caractérisation exhaustive sont donc nécessaires.

3.1.1.2.1. Caractéristiques propres à la filière

La filière peut être caractérisée par des aspects techniques, ou structurels et organisationnels. Les caractéristiques propres de la filière seront synthétisées à la figure 17 (voir § 3.1.1.2.1.2.4).

3.1.1.2.1.1. Caractéristiques techniques

Les caractéristiques techniques de la filière font référence aux méthodes, techniques, savoir-faire et exigences mis en œuvre en son sein.

3.1.1.2.1.1.1. Responsabilité exigée au producteur

Les filières de traitement des produits en fin de vie peuvent être différenciées selon le niveau d'engagement exigé au producteur vis-à-vis du traitement de son produit en fin de vie :

- *REP*. Les filières à responsabilité élargie du producteur sont celles traitant de déchets dont la gestion en mélange pose des difficultés pour les valoriser et qui sont à l'origine de coûts de gestion importants. Ces filières sont soumis à la REP soit par une législation européenne, par des réglementations nationales ou voir même de façon volontaire ;
- *sans REP*. Ce sont les filières traitant de flux des déchets qui ne sont pas concernés par la REP.

3.1.1.2.1.1.2. Nature du déchet

Trois types des filières se distinguent selon la nature du déchet à traiter (Maudet-Charbuillet 2009). Ce sont les filières dites :

- *produit*. La filière se concentre uniquement sur le traitement d'un produit unique ou d'une typologie de produit spécifique (p. ex. VHU, DEEE, etc.). Les produits traités peuvent être complexes et multimatériaux ;

- *composant*. La filière tend à préserver la valeur fonctionnelle ou la valeur matière de sous-ensembles, modules ou pièces (p. ex. cartes électroniques, piles et accumulateurs, etc.) ;
- *matière*. Ce type de filière ne traite qu'une seule nature de matériau (p. ex. acier, papier et carton, verre, métaux non ferreux, etc.) indépendamment du produit d'origine pour en préserver la valeur matière. Elles gèrent ainsi le traitement de produits simples et très souvent monomatériaux.

3.1.1.2.1.1.3. Périmètre de la filière

Le périmètre de la filière est défini par l'ensemble des opérations (principales ou secondaires) dont elle est responsable. La caractérisation consiste ici à définir où commence et où s'arrête son champ d'action.

Par exemple, la filière de recyclage débute par la collecte des déchets et s'achève par le procédé de recyclage à proprement parler (c.-à-d. la régénération de la matière), et s'articule comme suit :

- la *collecte*. Les déchets sont collectés dans les habitations individuelles, les déchetteries, les points de collecte (fixes ou mobiles), les industries, etc. et transportés vers le centre de traitement ;
- la *dépollution*. Les matières dangereuses sont extraites des flux de déchets pour être traitées en toute sécurité et éviter la contamination ultérieure des autres matériaux dans le processus de valorisation ;
- le *désassemblage*. Chaque composant pouvant être réutilisé, ou pouvant ou devant être traité séparément (pour préserver sa valeur ou en raison d'un processus de recyclage plus complexe) est enlevé ;
- la *déchetage*. C'est un premier broyage qui transforme le produit en résidus plus faciles à traiter ;
- la *broyage*. Il sert à obtenir des particules mono-matériau plus facilement séparables ;
- la *tri*. Les particules sont séparées selon leur nature (p. ex. matériaux ferreux, non ferreux, plastiques, etc.) ;
- le *recyclage* à proprement parler. Cet ensemble de procédés transforme les matériaux récupérés en matières premières secondaires.

3.1.1.2.1.1.4. Réseaux d'acteurs

Les acteurs de la filière sont les responsables des différentes étapes du processus de traitement. Ils peuvent être des collecteurs, des opérateurs de dépollution, des démonteurs, des broyeurs, des recycleurs, etc. Chaque opérateur peut être responsable d'une ou plusieurs opérations du processus de traitement.

Pour bien caractériser la filière, il est donc important d'identifier le réseau d'acteurs concernés et les flux de matières, d'information, voire économiques existants.

3.1.1.2.1.1.5. Caractéristiques des intrants

L'efficacité du processus de traitement est étroitement liée aux caractéristiques des déchets l'intégrant, comme par exemple :

- l'*origine des composants*, autrement dit la nature du dernier détenteur (c.-à-d. particulier ou industrie) ;
- la *complexité du déchet* (p. ex. produit ou module, composant mono- ou multimatériau, etc.) ;
- la *localisation* (p. ex. déchets provenant du voisinage proche, d'une région éloignée dans un même pays, de l'étranger, etc.) ;
- sa *valorisabilité*⁸ (fonctionnelle, matière et/ou énergétique) ;
- les *caractéristiques du gisement* (p. ex. masse, volume, toxicité, valeur économique, etc.).

⁸ Valorisation potentielle du produit par la filière de traitement en fin de vie. Cette notion sera précisément définie ultérieurement, au paragraphe 3.2.2.1 du Chapitre 2.

Ces caractéristiques peuvent induire des choix importants dans la définition du circuit de traitement (p. ex. d'extraire ou non certains composants), et donc dans l'efficacité-même du recyclage.

3.1.1.2.1.1.6. Propriétés des extrants

Ce sont les propriétés des produits issus des différentes voies de valorisation. Ce sont par exemple les caractéristiques mécaniques de la matière première secondaire (c.-à-d. recyclée) ou la conformité au cahier des charges du produit d'un module reconditionné. En général, elles sont exigées dans le cahier de charges du marché autrement dit par l'acheteur du produit issu de la filière.

3.1.1.2.1.2. Caractéristiques structurelles et organisationnelles

La structure et l'organisation de la filière de traitement influencent la façon de gérer les flux de matière, d'informations et de capitaux. C'est pourquoi ces caractéristiques sont aussi importantes que les caractéristiques techniques listées précédemment.

3.1.1.2.1.2.1. Mode d'organisation

Les producteurs en charge de la gestion de leurs produits en fin de vie peuvent se distinguer selon qu'ils transfèrent ou non la responsabilité financière et/ou organisationnelle de leur action (ADEME 2015a). On identifie ainsi trois schémas principaux :

- le schéma *individuel*. Le producteur assume lui-même la collecte et le traitement des produits qu'il a mis sur le marché ;
- le schéma *mutualisé*. L'organisation, la collecte et le traitement des produits en fin de vie est confié à un prestataire ou à une structure dont la gouvernance n'est pas assurée par les producteurs. Des producteurs de produits similaires sont souvent associés ;
- le schéma *collectif*. Les producteurs transfèrent leur responsabilité à un organisme collectif dénommé *éco-organisme* auquel ils adhèrent, et dont ils peuvent éventuellement être actionnaires. Cet organisme perçoit une écocontribution leur permettant de mettre en œuvre l'organisation de la filière. Contrairement au schéma mutualisé, les producteurs participent directement à la gouvernance (gestion et administration) de l'éco-organisme (p. ex. en France pour la filière DEEE ménagers, les trois éco-organismes en charge de la collecte et le traitement des déchets sont : Ecologic, ESR et PV Cycle).

3.1.1.2.1.2.2. Structure

La structure de la filière est directement liée au principe d'économie circulaire. Elle peut ainsi être :

- *une boucle fermée*. Les composants réutilisables et les matériaux recyclés sont intégrés dans un nouveau cycle aux fins de leur application d'origine ;
- *une boucle ouverte*. Les composants et les matériaux recyclés sont réutilisés pour de toutes autres applications.

3.1.1.2.1.2.3. Motivation

Cette caractéristique traduit la motivation première de la filière qui peut ainsi être liée à :

- *la législation*. La filière a été créée avec une motivation environnementale encadrée par une législation ;

- *aux affaires*. La filière a été créée avec une motivation économique, c'est-à-dire essentiellement pour générer de la valeur économique.

3.1.1.2.1.2.4. Synthèse des caractéristiques propres de la filière

La figure 17 propose une vue synthétique des caractéristiques d'une filière de traitement des déchets listées précédemment.

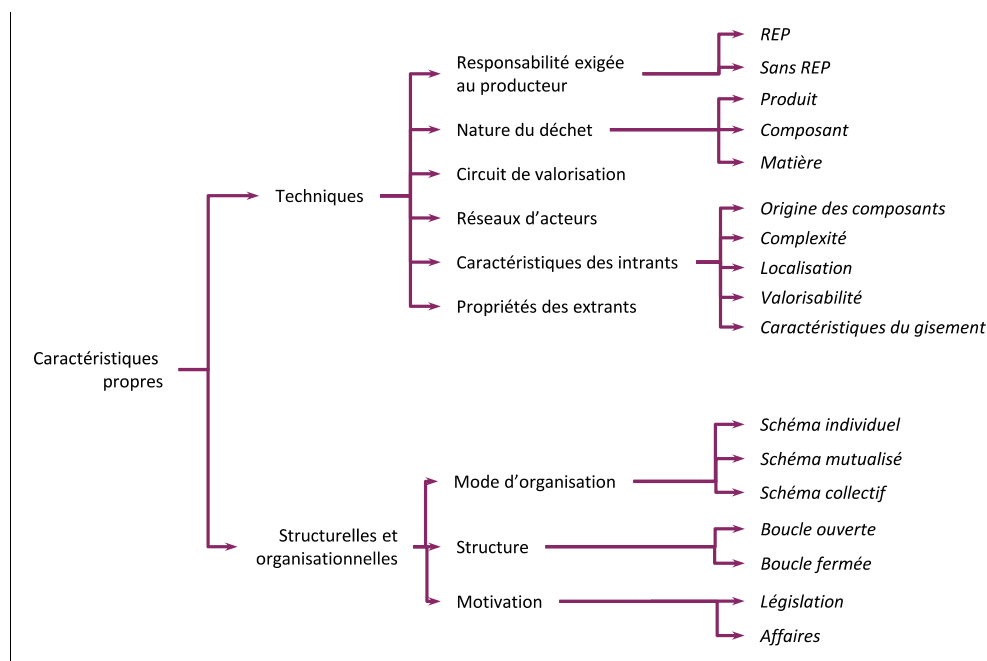


Figure 17. Caractéristiques propres à une filière de traitement du produit en fin de vie

3.1.1.2.2. Facteurs externes à la filière

Les facteurs externes regroupent l'ensemble des éléments ayant une influence plus ou moins directe sur la performance de la filière. Une synthèse en sera proposée à la figure 18 (voir § 3.1.1.2.2.6).

3.1.1.2.2.1. Prix des matières premières

Les matières premières secondaires (recyclées) sont encore (et seront longtemps) comparées aux matières premières primaires, non seulement sur le plan de leurs propriétés physiques ou mécaniques, mais aussi d'un point de vue économique. Aussi, le cours des matières premières primaires influe directement sur la filière de traitement, un prix inférieur étant attendu pour les matières recyclées même à qualité égale. (ADEME 2015c)

3.1.1.2.2.2. Variabilité géographique

Les acteurs de la filière de traitement sont généralement répartis sur de grands territoires car les filières sont des systèmes :

- *décentralisés* : le même procédé est utilisé dans plusieurs installations ;
- et *multiniveaux* : les procédés de recyclage sont réalisés consécutivement sur des sites différents.

En conséquence, la filière présente une variabilité géographique (Mathieux 2002). Des différences entre acteurs d'une même filière sont attendues sur plusieurs plans selon leur localisation :

- *Législation*. Les lois (qui bornent le champ d'action de la filière) diffèrent d'un pays à l'autre, et même d'une région à une autre au sein d'un même pays ;
- *Ressources logistiques*. De même, les ressources logistiques disponibles varient selon l'emplacement des acteurs de la filière. En prenant cela en compte, il faut noter que les ressources matérielles à disposition de la filière (p. ex. nombre de points de collecte), leur répartition et leur densité vont bénéficier au bon fonctionnement de la filière de recyclage ou au contraire le limiter.
- *Regard de la communauté sur les pratiques de recyclage*. Certaines communautés sont plus respectueuses de l'environnement que d'autres. Il est donc important d'encourager les moins motivées à participer activement aux activités associées.

3.1.1.2.2.3. Variabilité temporelle

La filière de traitement est principalement affectée par deux facteurs de variabilité temporelle : l'espérance de vie du produit et ses évolutions (Mathieux 2002).

- *Espérance de vie*. La performance de traitement d'un produit ne peut être mesurée qu'une fois le produit réellement arrivé en fin de vie. Cet aspect se révèle donc problématique pour ceux ayant une longue durée de vie. En effet, il devient alors plus difficile d'implémenter des stratégies d'écoconception pour améliorer la filière. En d'autres termes, il est plus difficile d'établir alors un lien entre conception et fin de vie. On distingue ainsi trois catégories de produits selon leur durée de vie :
 - *Durée de vie courte*. Un produit à durée de vie courte perd rapidement son utilité et est alors jeté (p. ex. emballages, suremballages, etc.) ;
 - *Durée de vie moyenne*. Nous fixons, de façon arbitraire, le seuil de durée de vie dite *moyenne* à deux ans (p. ex. équipements électriques et électroniques (EEE), vêtements, etc.) ;
 - *Durée de vie longue*. Cette catégorie regroupe tous les produits dont la durée de vie supérieure à deux ans (p. ex. certains électroménagers comme un four ou un réfrigérateur, meubles, véhicules, etc.).
- *Évolution du produit*. Les produits sont en évolution continue et les filières de traitement doivent être capables d'anticiper et d'évoluer parallèlement pour intégrer au mieux ces modifications. En effet, la plupart du temps les modifications sont mineures (p. ex. modification dans le design d'un emballage) ou pas assez conséquentes pour que la filière soit affectée (p. ex. les modifications d'une année à l'autre d'un téléphone portable ou d'un véhicule à moteur thermique). Cependant, le produit peut aussi être modifié en profondeur (p. ex. véhicule électrique, écrans LCD, etc.).

3.1.1.2.2.4. Interaction avec d'autres filières existantes

Ce facteur fait référence au degré de similitude d'une filière avec une autre déjà existante (Fleischmann et al. 2000). L'existence d'autres filières qui traitent déjà le même type de matériaux, ou qui ont des procédés similaires qui pourraient à terme être utilisés dans la filière doit être vérifiée. L'intérêt est de profiter au maximum des connaissances existantes pour mieux satisfaire les attentes du marché. On distingue deux cas de figure :

- *Système unique*. Il n'y a pas d'autre système équivalent (p. ex. filières de recyclage de pneus ou de cartes électroniques) ;
- *Extension d'un système existant*. S'il existe un système équivalent, il doit être préalablement étudié (p. ex. la filière VHU qui traite des matériaux tels que les métaux, le verre et les plastiques pourrait profiter des

connaissances d'autres filières de recyclage de ces types de matériaux mais issus d'autres produits, et réciproquement).

3.1.1.2.2.5. Interaction entre les différents voies de valorisation

En général, les différentes voies de valorisation sont en interaction constante et il y a souvent des acteurs communs. Afin d'améliorer cet échange, il est important de bien identifier les liens entre les acteurs des valorisations fonctionnelle, matière et énergétique, et de l'élimination.

3.1.1.2.2.6. Synthèse des facteurs externes de la filière

La figure 18 propose une vue synthétique des facteurs externes à la filière de traitement.

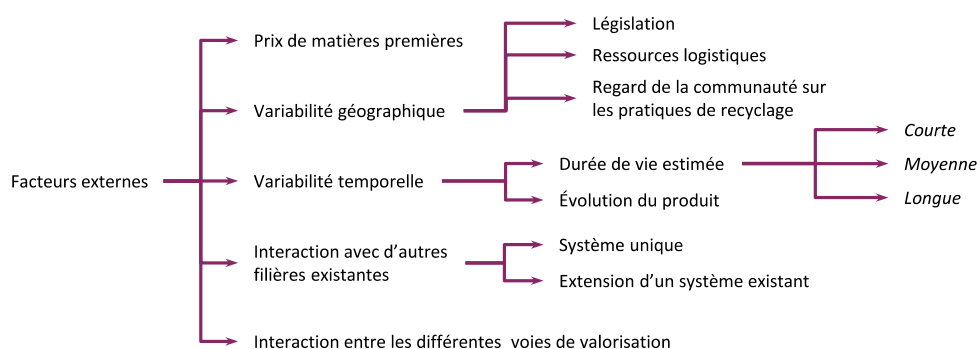


Figure 18. Facteurs externes à une filière de traitement

3.1.2. Évaluer la performance de valorisation d'une filière de traitement

3.1.2.1. Notions de performance et performance de valorisation (d'une filière de traitement)

La notion de performance s'applique à tout système ordonné (individu, organisation, machine, procédé, etc.) produisant un extrant (résultat de toute nature) à partir d'un intrant (ensemble de ressources). C'est une variable latente, autrement dit une grandeur *qui n'est pas directement observable mais déduite d'une ou plusieurs variables (indicateurs) appartenant au champ d'investigation empirique* (Valette-Florence 1988).

La performance exprimant (en français⁹) la capacité optimale (ou maximale) à une réalisation, le concept peut donc être d'abord défini par la notion de résultats.

Dans le cadre de la gestion des organisations publiques, Gibert (Gibert 1980) a décrit la performance comme la relation ternaire entre :

- les *objectifs* visés (cibles, estimations, projections, etc.) ;
- les *moyens* mis en œuvre pour les réaliser (ressources humaines, matérielles, financières ou informationnelles) ;

⁹ Nous prendrons soin de ne pas utiliser le terme *performance* en tant qu'anglicisme sémantique^{*} : il se réfère ainsi parfois au *comportement* (p. ex. dans l'expression *performance environnementale*) ou à la *tenue d'un produit*. [^{*} Attribution au mot français d'une acception qu'il n'a normalement qu'en anglais, ou traduction littérale d'une expression idiomatique anglaise (construction ou locution propre à une langue, portant un sens par son tout, et non par chacun des mots qui la composent).]

- et les *résultats* obtenus (biens, produits, services, etc.).

En s'appuyant sur ce triptyque, il évalue dès lors la performance au travers de trois notions seulement :

- l'*efficacité* (*effectiveness*)¹⁰ qui exprime le degré d'accomplissement des objectifs fixés. C'est le taux¹¹ qui compare les résultats obtenus aux objectifs fixés ;
- l'*efficacité* (*efficiency*) qui évalue les résultats par rapport aux moyens mis en œuvre. C'est donc le rapport entre les résultats réellement obtenus et les ressources utilisées pour les atteindre. Ce rapport n'est donc pas un taux puisqu'il compare des grandeurs de natures potentiellement différentes. L'efficacité¹² peut aussi être définie comme l'aptitude à fournir le meilleur rendement, c'est-à-dire la capacité à atteindre les résultats théoriquement atteignables ;
- et la *pertinence* qui apprécie l'adaptation des moyens à mettre en œuvre pour réaliser les objectifs fixés.

Remarque Il convient de ne pas confondre efficacité et efficience. Par exemple, un procédé est efficace s'il permet de réaliser pleinement l'objectif initial. Il est donc efficace si un minimum de ressources est utilisé pour atteindre cet objectif. En revanche, il est efficace si un minimum de ressources est utilisé pour atteindre un objectif. Il est donc efficace s'il permet de réaliser pleinement cet objectif.

Gibert a choisi de représenter sa vision de la performance en s'appuyant sur un triangle où la performance est placée au centre, les résultats, objectifs et moyens aux angles et l'efficacité, l'efficience et la pertinence sur les côtés.

Nous préférons ici modifier légèrement cette représentation et placer l'efficacité, l'efficience et la pertinence aux angles et non sur les côtés (voir figure 19). Le but de ce changement est d'une part, de donner plus d'importance aux notions d'efficacité, d'efficience et de pertinence, qu'à celles d'objectifs, moyens et résultats. Par ailleurs, cela permet d'insister sur le fait que la performance peut être vue et interprétée à partir d'une de ses trois déclinaisons, ou mieux comme une relation ternaire.

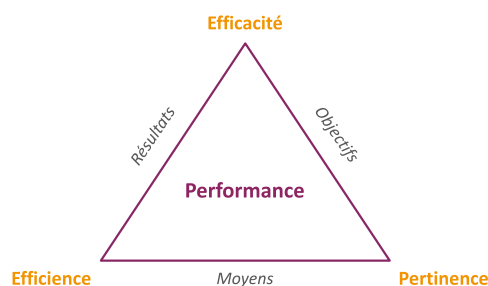


Figure 19. Représentation adaptée du triangle de la performance (Gibert 1980)

L'intérêt que l'on porte à cette approche réside donc dans la limitation de cette notion à trois concepts clés relativement simples, mais potentiellement déclinables sur les plans économique, technique, environnemental ou social.

¹⁰ Le rappel des termes anglais vise également à appuyer la définition des concepts et à éviter toute erreur de traduction, ou emploi erroné d'anglicisme.

¹¹ Un taux désigne le rapport quantitatif de deux grandeurs de même nature. Il est sans unité, et le plus souvent exprimé en pourcentage.

¹² ... d'une machine, d'une technique, d'un individu ou d'une entreprise.

En effet, bien que cette définition de la performance ait été initialement proposée dans le cadre de la gestion des organisations publiques, elle a été reprise dans différents domaines, pour évaluer par exemple les chaînes d'approvisionnement (Leończuk 2016), les filières de traitement de déchets (Rogaume 2006) ou même la performance en conception (Maranzana 2009).

Rogaume propose donc d'associer les objectifs aux seuils réglementaires imposés au traitement du déchet, les moyens à l'ensemble des opérations de traitement de la filière et les résultats à la matière valorisée, aux déchets ultimes et aux rejets dans l'environnement. Il propose ainsi que :

- la *pertinence du traitement* dépend de (i) la compatibilité physicochimique du déchet avec la finalité¹³ de la filière, (ii) la compatibilité réglementaire du déchet avec la filière et (iii) la compatibilité du déchet vis-à-vis du fonctionnement de la filière ;
- l'*efficacité du traitement* est liée à la capacité de la filière (i) à valoriser la fraction valorisable et (ii) à éliminer ou retenir les polluants contenus dans le déchet ;
- l'*efficience du traitement* peut être évaluée d'un point de vue (i) économique (évaluation des coûts et des gains éventuels du traitement) ou (ii) environnemental (évaluation du rapport entre le résultat et le coût environnemental du traitement).

3.1.2.2. Méthodes d'évaluation de la performance de valorisation d'une filière de traitement

L'évaluation de la performance d'une filière de traitement est nécessaire pour développer et dynamiser l'économie circulaire. En effet, cette évaluation permet de vérifier le bon fonctionnement de la filière et d'identifier les procédés ou les acteurs les moins performants.

3.1.2.2.1. Méthodes de référence

L'inventaire des méthodes d'évaluation de référence a été effectué à partir de l'analyse des méthodes d'évaluation de la performance de valorisation des filières à responsabilité élargie du producteur (REP). L'étude se limite ici à ce type de filières puisque la législation définit le niveau de performance à atteindre et leur mode de calcul.

La politique de la REP met en application le principe du pollueur-payeur¹⁴ dans la mesure où la responsabilité financière du traitement des produits en fin de vie est transférée des contribuables et des communes aux producteurs (OCDE 2017).

Les produits hors d'usage concernés par la REP sont d'abord ceux dont la gestion en mélange pose des difficultés pour les recycler ou les valoriser, et qui sont à l'origine de coûts de gestion importants. Ce sont aussi les déchets dont la complexité ou la dispersion rendent la gestion plus coûteuse, ou ceux contenant des matériaux dont la récupération est environnementalement et stratégiquement importante. (ADEME 2017a)

Le cadre législatif pour développer la responsabilité élargie des producteurs au niveau de l'Union Européenne se compose à la fois d'une législation générale sur la gestion des déchets et de directives spécifiques encadrant la valorisation et le recyclage de ces flux de déchets spécifiques (Monier et al. 2014). Pour encourager ce mode de gestion, l'Union européenne a publié à ce jour

¹³ La *finalité* englobe à la fois l'opération que la filière est sensée effectuer et la cible qu'elle vise dans le déchet (c.-à-d. la valorisation ou l'élimination) (Rogaume 2006).

¹⁴ L'article L110-1 du Code de l'environnement définit la notion de pollueur-payeur comme le principe selon lequel les frais résultant des mesures de prévention, de réduction de la pollution et de lutte contre celle-ci doivent être supportés par le pollueur.

- cinq directives portant respectivement sur
 - les piles et accumulateurs (Directive 2006/66/CE) ;
 - les équipements électriques et électroniques (Directive 2012/19/UE) ;
 - les véhicules hors d'usage (Directive 2000/53/CE) ;
 - les emballages ménagers (Directive 94/62/CE) ;
 - et les médicaments (Directive 2004/27/CE) ;
- et un règlement pour les fluides frigorigènes fluorés (Règlement n° 1005/2009/CE).

(ADEME 2017a). Néanmoins, d'autres filières ont aussi été mises en œuvre par le biais d'une réglementation nationale (p. ex. les filières des pneumatiques, des papiers graphiques et des produits chimiques en France, voir figure 23) ou de régimes volontaires (p. ex. les filières des produits de l'agrofourriture, des mobil-homes et des cartouches d'impression en France, voir figure 23) (Monier et al. 2014).

La performance de ces filières de traitement est systématiquement évaluée sur les trois mêmes critères :

- le taux de collecte : c'est le pourcentage massique de produits en fin de vie collectés sur l'ensemble des produits en fin de vie (gisement estimé¹⁵) ;
- le taux de réutilisation et recyclage : c'est le pourcentage massique de l'ensemble des produits traités par la filière qui est recyclé, réutilisé, ou les deux ;
- et le taux de valorisation : c'est le pourcentage massique de l'ensemble des produits traités par la filière qui est valorisé (tous les types de valorisation confondus : fonctionnelle, matière et énergétique).

Une illustration de ces définitions est proposée à la figure 20. Il est important de bien souligner que cette quantification est massique.

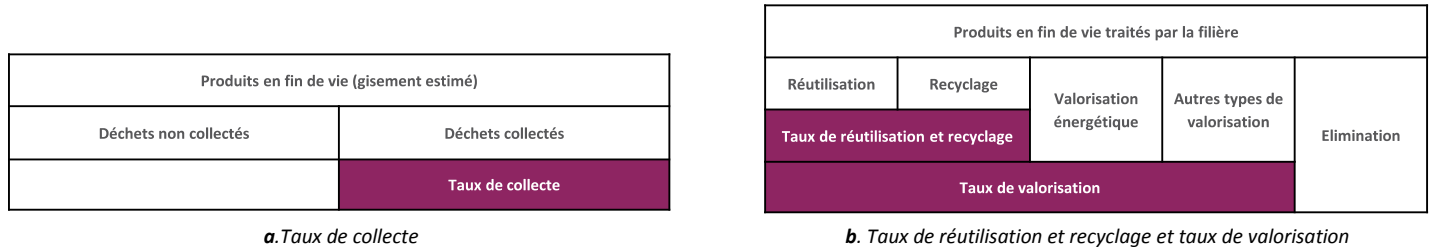


Figure 20. Représentation graphique des taux de performance de la filière

Les objectifs de valorisation que les filières REP doivent atteindre sont cependant définis dans les directives associées.

Il est important de bien connaître le périmètre de la filière pour bien interpréter les résultats et les limites d'analyse de ces indicateurs.

Ainsi, le champ d'action réglementaire de la filière de traitement des produits en fin de vie s'étend de l'instant où le produit est assimilé à un déchet à la perte de ce statut. La filière est donc en charge de collecter le produit en fin de vie, de démonter les pièces et modules pouvant être réutilisés, de préparer et traiter le reste (c.-à-d. de broyer et trier les matières en vue de leur recyclage ou de leur valorisation énergétique) pour diriger ensuite ces éléments vers les acteurs des différentes voies de valorisation. Ces derniers acteurs ne sont donc pas inclus dans le périmètre de la filière, tout comme les éléments non valorisables qui sont envoyés vers une installation d'élimination (incinération sans valorisation énergétique ou enfouissement) (voir figure 21).

¹⁵ Le gisement de déchets est souvent estimé à partir de la quantité totale des produits mis sur le marché par les producteurs.

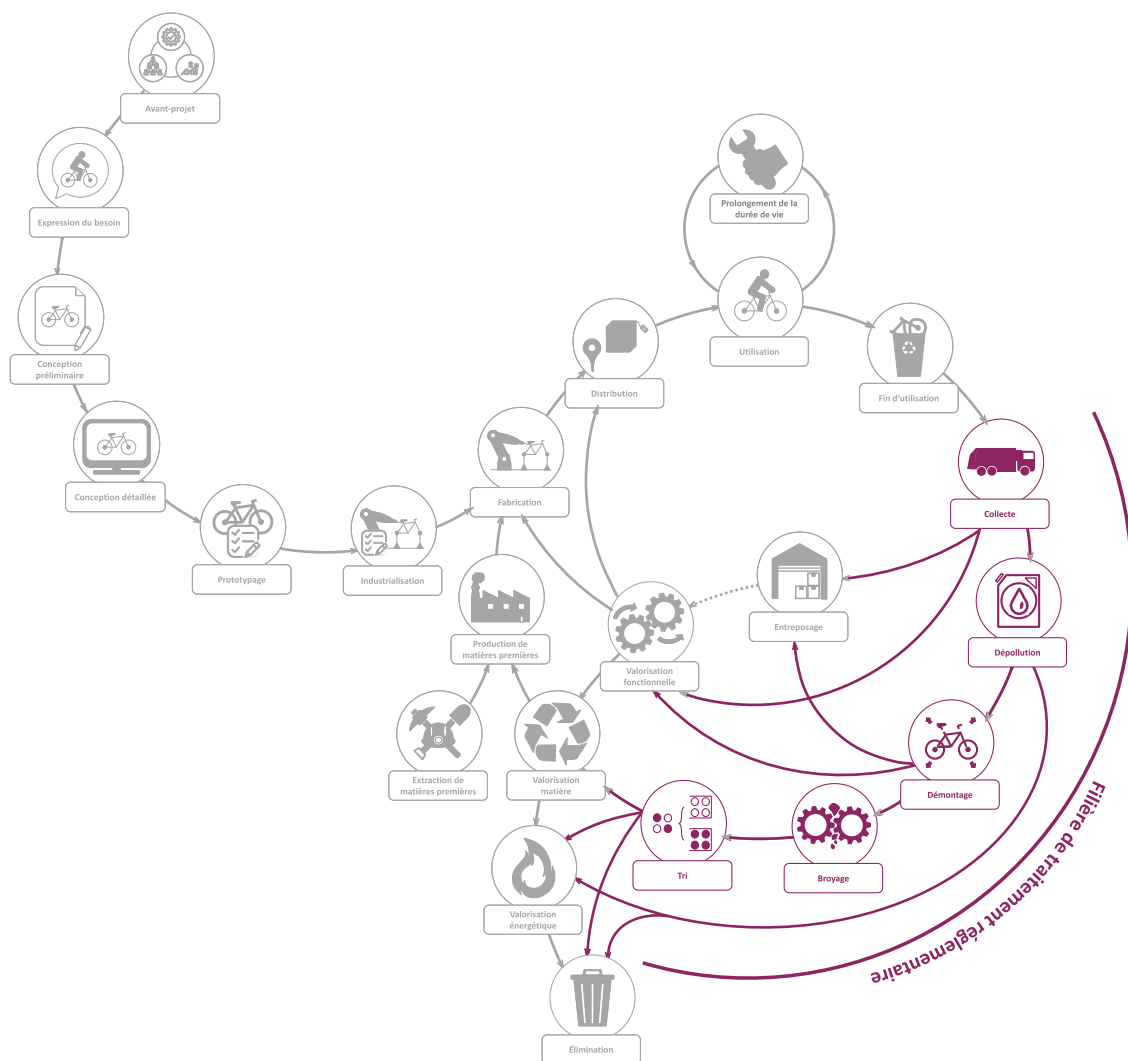


Figure 21. Périmètre d'action de la filière de traitement réglementaire

Il est important de noter que bien que le principe de l'indicateur soit le même pour toutes les filières, le mode de calcul peut changer l'une à une autre. En outre pour une même filière, les taux sont rarement calculés de la même manière dans tous les États membres de l'Union Européenne (Monier et al. 2014). Il n'y a donc pas une méthode de référence unique pour évaluer la performance de la filière.

Il est important de bien prendre en compte ces informations pour comparer les performances de filières de même nature, mais dans des pays différents ; si les périmètres d'analyse diffèrent, les résultats ne seront évidemment pas comparables.

Dans ce cadre, Horta Arduin *et al.* ont évalué l'influence de la définition du périmètre d'analyse dans le calcul du taux de recyclage de la filière (Horta Arduin et al. 2019). Pour ce faire, d'autres périmètres d'analyse complémentaires à celui défini par la législation ont été proposés et les résultats ont été comparés. À titre d'étude de cas, les périmètres complémentaires proposés ont été appliqués à filière de traitement des écrans plats en France. Les résultats de cette étude sont présentés à la figure 22.

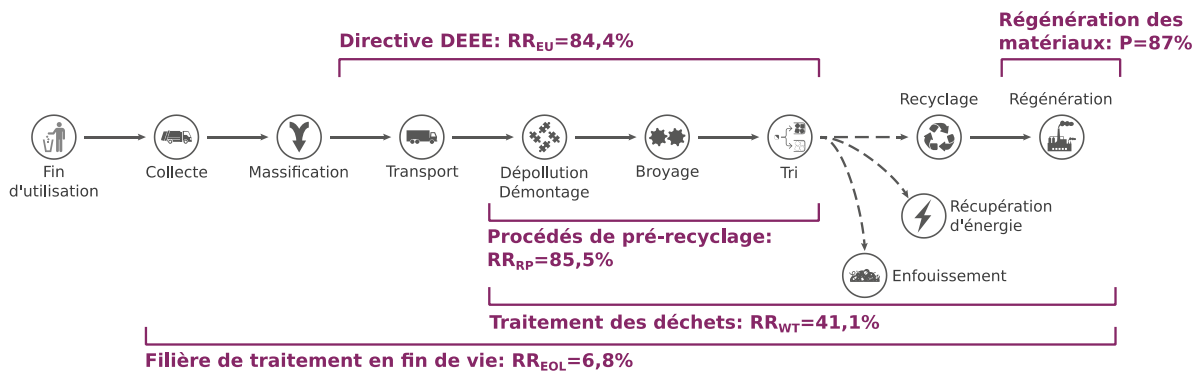


Figure 22. Influence du périmètre d'analyse dans le calcul du taux de recyclage de la filière (Horta Arduin et al. 2019)

3.1.2.2.2. Méthodes utilisées dans un domaine similaire.

Évaluation de la performance des chaînes approvisionnement

Les filières de traitement des produits en fin de vie présentent de nombreuses similitudes avec les chaînes d'approvisionnement conventionnelles (voir § 2.2.1). Ce sont toutes deux des systèmes industriels chargés de la transformation d'un intrant en extrant, soumis à des contraintes économiques, techniques et législatives. La filière de traitement des produits en fin de vie peut ainsi être perçue comme une chaîne d'approvisionnement de composants de deuxième génération et de matière première secondaire.

Compte tenu des similitudes entre ces deux systèmes, il a été choisi d'analyser les méthodes d'évaluation de la performance du premier. La gestion de la chaîne d'approvisionnement est un domaine d'étude bien développé qui s'appuie traditionnellement sur l'évaluation et l'optimisation de la performance économique et technique de ces systèmes. Les études associées aux chaînes d'approvisionnement vertes ont aussi été considérées puisque leur analyse prend en compte la filière de traitement des déchets.

Leończuk (Leończuk 2016) a réalisé une synthèse des méthodes d'évaluation et conclut qu'aucune approche ne semble universelle. Il existe cependant des modèles bien établis tel que les *Balanced Scorecard* et *SCOR* ainsi que la méthode *ressource, sortie, flexibilité*. En revanche, il montre que les études qui ne les utilisent pas organisent leurs indicateurs :

- selon le processus de prise de décision (niveau stratégique, tactique et opérationnel) ;
- du point de vue économique (indicateurs financiers et non financiers) ;
- en fonction de leur nature (qualitative et quantitative).

Il existe donc une grande variété d'indicateurs mesurant la performance des chaînes d'approvisionnement. Ils sont dits *indicateurs clés de performance* (*Key Performance Indicators* : KPI). Le tableau 3 propose une synthèse de ces paramètres clés, classés par catégories.

	Auteurs	Année	Catégorie							Référence	
			Économie	Environnement	Flexibilité	Innovation	Logistique	Satisfaction du client	Techniques (produit)		Techniques (procédé)
	Beamon	1999	•	•					•	•	(Beamon 1999b)
	Beamon	1999	•		•			•	•	•	(Beamon 1999a)
	Gunasekaran, Patel et Tirtiroglu	2001	•		•			•	•		(Gunasekaran, Patel, et Tirtiroglu 2001)
	Chan	2003	•		•	•		•	•		(Chan 2003)
	Gunasekaran, Patel et McGaughey	2004	•		•			•	•		(Gunasekaran, Patel, et McGaughey 2004)
	Thakkar, Kanda et Deshmukh	2009	•			•		•	•		(Thakkar, Kanda, et Deshmukh 2009)
	Azevedo Carvalho et Cruz Machado	2011	•	•					•		(Azevedo, Carvalho, et Cruz Machado 2011)
	Olugu, Wong et Shaharoun	2011	•	•	•			•	•	•	(Olugu, Wong, et Shaharoun 2011)
	ADEME	-	•							•	(ADEME 2016e; 2015d)

Tableau 3. Catégories de paramètres clés de performance trouvés dans la littérature

La performance de la filière est donc une grandeur multidimensionnelle qui ne peut être pleinement évaluée qu'en prenant en compte ses dimensions techniques, économiques, organisationnelles et environnementales. Son évaluation passe donc d'une part par l'identification des matières clés à recycler, que ce soit du point de vue de leur valeur (économique ou stratégique) ou des quantités utilisées, et d'autre part par l'exploitation des synergies entre filières pour optimiser leurs performances de traitement et homogénéiser les pratiques. La performance ne peut donc être évaluée que dynamiquement et plusieurs types de produits doivent être considérés pour que la notion de synergie soit prise en compte.

3.1.2.3. État de lieux de la performance de filières REP en France

3.1.2.3.1. Filières REP françaises

La France est le pays qui recourt le plus au monde à la gestion des déchets par des filières à responsabilité élargie du producteur. Il en existe près de vingt dont quatorze obligatoires (ADEME 2015a). Selon l'origine de la REP (c.-à-d. issue d'une réglementation ou d'un régime volontaire), nous avons :

- six filières européennes :
 - trois issues d'une réglementation REP européenne : piles et accumulateurs, équipements électriques et électroniques, et automobiles ;
 - et trois d'une réglementation européenne transposée en REP française : emballages ménagers, gaz fluorés et médicaments ;
- huit filières françaises (issues d'une réglementation REP nationale) : pneumatiques, papiers graphiques, textiles, linge de maison et chaussures, activités de soins à risques infectieux, produits chimiques, éléments d'ameublement, bouteilles de gaz et bateaux de plaisance ou de sport ;
- trois filières volontaires : produits de l'agrofourriture, cartouches d'impression bureautique et mobiles.

La chronologie de leur mise en œuvre opérationnelle est présentée à la figure 23.

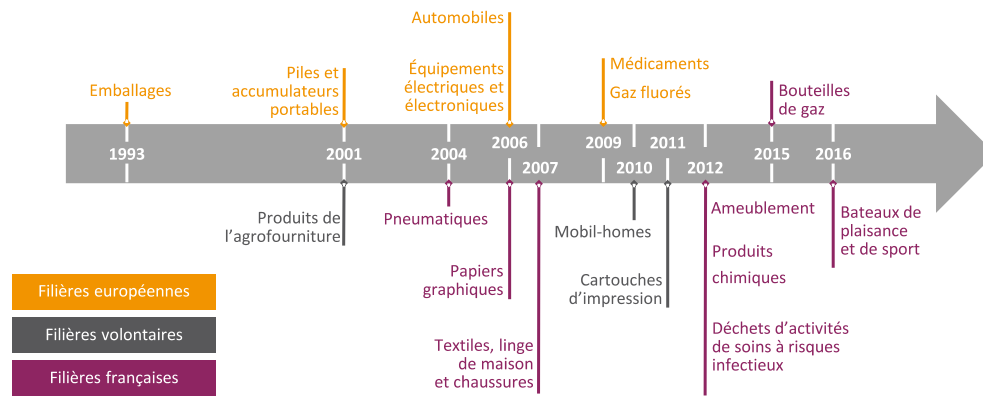


Figure 23. Chronologies des mises en œuvre opérationnelles¹⁶ des filières REP en France (ADEME 2017a)

3.1.2.3.2. Bilan global des filières REP

En 2010, 5,4 millions de tonnes de déchets à recycler ont été collectées par huit filières REP (ADEME 2012). La figure 24 permet d'analyser cette information selon deux points de vue :

- la répartition par filière (figure 24a) permet d'identifier les typologies ou les familles des produits qui génèrent le plus de déchets dans un premier temps et de voir comment les réduire en ciblant des objectifs de réduction des déchets pour ces produits dans un deuxième temps. À ce sujet, on distingue que les emballages ménagers, VHU et papiers graphiques représentent à eux seuls 89 % ;
- la répartition par matériaux (figure 24b) permet d'identifier les matériaux les plus présents parmi tous les déchets afin d'identifier dans un second temps s'ils sont récupérés ou non. Le verre, les métaux ferreux et les papiers et cartons représentent ici 84 %.

3.1.2.3.3. Bilan relatif à la production de matières premières

En 2012, la matière première produite intégrait une part importante de matière première secondaire (c.-à-d. recyclée) pour la plupart des matériaux étudiés :

- 40,9 % pour les métaux ferreux (dont 12 % issus des filières REP) ;
- 46,4 % de métaux non ferreux¹⁷ (dont 15,2 % issus des filières REP) ;
- 59,8 % de papiers et cartons¹⁸ (dont 16,5 % issus des filières REP) ;
- 49,5 % de verre (dont 84 % issus des filières REP) ;
- 5,3 % de plastiques (dont 57,7 % issus des filières REP) ;
- et enfin, la contribution des filières REP au recyclage des textiles a été de 99,7 %.

(ADEME 2012)

¹⁶ Date du premier agrément ou date de fonctionnement opérationnel de l'organisation ou date de prise en charge des produits usagés

¹⁷ Les métaux non ferreux considérés sont l'aluminium, le cuivre, le plomb et le zinc.

¹⁸ Les papiers et cartons considérés sont les papiers industriels et spéciaux, les papiers d'hygiène, le carton ondulé, les emballages souples, les cartons plats, les papiers de presse, d'impression et d'écriture.

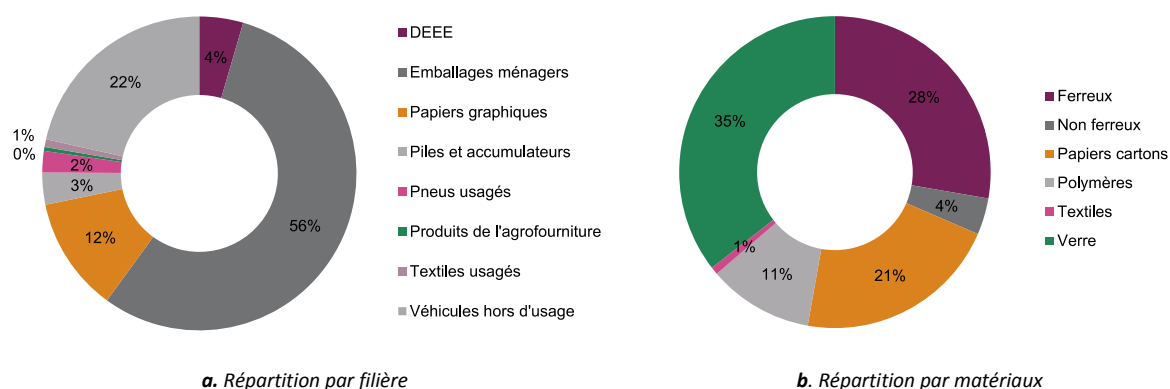


Figure 24. Répartition des déchets en France par type de filière et par matériaux (ADEME 2012)

Ces chiffres confirment que pour la plupart des matériaux, le recyclage tient une part importante de la production de matière première (entre 40 % et 60 %). En revanche pour les plastiques, le faible taux s'explique en grande partie par les difficultés intrinsèques à leur recyclage et à leurs caractéristiques propres : faible densité, grande dispersion dans les usages et grandes variétés de polymères et de grades (ADEME 2012).

3.1.2.3.4. Analyse comparative des filières REP

Le tableau 4 compare les performances du taux de collecte et des taux de traitement (c.-à-d. les taux de valorisation¹⁹, le taux d'élimination et les pertes) des 14 filières REP françaises. Les chiffres sont basés sur les déclarations annuelles de leurs acteurs sur la plateforme SYDEREP. Y sont déclarées les quantités mises sur le marché, collectées et traitées (en précisant la voie de traitement de chaque fraction).

Il faut préciser que les taux de valorisation (c.-à-d. réutilisation, recyclage, valorisation énergétique et autres) se calculent par rapport à la quantité totale de déchets traités et non la quantité totale collectée.

Le tableau présente non seulement un état de lieux des performances des filières REP en France, mais permet aussi de comparer les filières entre elles et vérifier alors si la typologie du produit ou le type de filière ont une influence sur la performance du traitement. Les chiffres qui y sont présentés montrent ainsi le degré d'intégration de chaque type de produit en fin de vie dans sa filière de traitement. Une analyse est menée ci-dessous pour chaque voie de traitement. Elle permet de comparer les filières pour comprendre le fonctionnement de ces systèmes.

¹⁹ Il faut bien distinguer *les taux de valorisation* (au pluriel) qui font séparément référence aux taux de réutilisation, de recyclage et de valorisation énergétique, du au terme *taux de valorisation* (au singulier) qui désigne la somme de tous les taux précédemment mentionnés.

Produit (et sigle associées à la filière)	Année de l'étude	Réemploi (%)	Collecte (%)	Traitement (%)	Réutilisation (%)	Recyclage (%)	Valorisation énergétique (%)	Autres types de valorisation (%)	Élimination (%)	Pertes procédé (%)	Références
Activités de soins à risques infectieux (DASRI)	2011	-	-	97,7	0,0	0,0	81,0	0,0	19,0	-	(ADEME 2013a)
Automobiles (VHU)	2014	-	55,6	94,9	10,0	67,5	4,6	0,0	7,9	-	(ADEME 2016e)
Éléments d'ameublement (DEA)	2015	0,3	36,2	46,1	0,6	53,2	26,2	0,0	20,0	-	(ADEME 2016c)
Emballages industriels et commerciaux (EIC ^{*20})	2012	-	-	73,7	0,0	64,0	9,7	0,0	26,3	-	(ADEME 2014b)
Emballages ménagers (EM [*])	2013	-	-	80,9	0,0	67,3	13,7	0,0	19,1	-	(ADEME 2014c)
Équipements électriques et électroniques (DEEE)	2014	-	34,0	99,1	3,0	78,0	9,0	0,0	10,0	-	(ADEME 2015d)
Fluides frigorigènes et gaz fluorés (FFGF [*])	2013	-	29,6	104,9	0,0	68,5	0,0	18,1	13,4	-	(ADEME 2014d)
Lubrifiants (HU)	2012	-	71,2	100,3	0,0	64,5	35,5	0,0	0,0	-	(ADEME 2013b)
Médicaments (MNU)	2015	-	64,0	100,0	0,0	0,0	100,0	0,0	0,0	-	(ADEME 2017b)
Papiers graphiques ménagers et assimilés (PGA [*])	2013	-	82,7	100,0	0,0	49,3	32,7	0,0	18,0	-	(ADEME 2015e)
Piles et accumulateurs (PA)	2015	-	92,4	101,3	0,0	81,8	0,1	0,0	15,4	2,7	(ADEME 2016d)
Pneumatiques (PU)	2014	-	91,8	103,5	14,7	24,2	50,5	10,6	0,0	-	(ADEME 2016b)
Produits chimiques des ménages (DDS ²¹)	2015	-	1,9	100,0	0,0	1,7	80,8	0,0	17,5	-	(ADEME 2017c)
Textiles, habillement, linge de maison et chaussures (TLC)	2014	-	29,2	88,9	64,2	29,1	1,45	3,5	1,5	-	(ADEME 2015g)

Tableau 4. Bilan de performances des filières REP en France

²⁰ * : sigle non officiel, mais utilisé dans la suite de ce document.

²¹ DDS : déchets diffus spécifiques

3.1.2.3.4.1. Réutilisation

Cinq filières sur les quatorze analysées pratiquent la préparation en vue de la réutilisation. Seule la filière de traitement des textiles, habillement, linge de maison et chaussures, réussit à en traiter une quantité importante (64,2 %). Les filières PU (pneumatiques usagés) et VHU (véhicules hors d'usage) réutilisent entre 15 % et 20 % de leurs déchets. Les deux dernières, DEEE (déchets d'équipement électriques et électroniques) et DEA (déchets d'éléments d'ameublement), en réutilisent moins de 3 %.

Les *filières produit* (telles que les filières VHU, DEEE, piles et accumulateurs (PA) et déchets d'éléments d'ameublement) devraient avoir pour objectif principal de préserver la valeur fonctionnelle du produit. Cependant, ces filières destinent aujourd'hui plus de déchets au recyclage (plus de 50 %) qu'à la réutilisation. Ceci s'explique soit par le fait que les produits ne sont pas conçus pour être réutilisés, soit parce qu'il n'est pas économiquement viable pour ces filières de récupérer pièces, modules ou sous-ensembles fonctionnels.

Ces chiffres mettent ainsi en évidence le manque d'adéquation entre le produit et sa filière de traitement en ce qui concerne la valorisation fonctionnelle. Les leviers techniques et économiques qui empêchent l'essor de cette voie de traitement doivent être étudiés.

3.1.2.3.4.2. Recyclage

Pour la majorité des filières analysées, le recyclage est la voie de traitement la plus importante (> 50 %).

Les *filières dites matière* (telles que les filières emballages ménagers (EM), emballages industriels et commerciaux (EIC), lubrifiants (HU), fluides frigorigènes et gaz fluorés (FFGF) et papier), ont pour objectif principal de récupérer la matière pour *refermer son cycle de vie*. On conçoit bien que la voie de traitement privilégiée par ces filières soit le recyclage (> 60 % dans la plupart des cas).

Les *filières dites produit* comme celles des piles et accumulateurs (taux de recyclage de 81,8 %) et DEEE (78 %) obtiennent des taux très élevés contrairement à ce qui aurait pu être attendu du fait que ces filières devraient avoir pour objectif principal de préserver la valeur fonctionnelle (voir § 3.1.2.3.4.1).

Enfin, la filière de traitement des produits chimiques des ménages (DDS) ne recycle que très peu de déchets (1,7 %). Les filières MNU (médicaments non utilisés) et DASRI (déchets d'activités de soins à risques infectieux) ne recyclent aucun déchet. Ils sont en effet considérés comme dangereux et la valorisation fonctionnelle et matière n'est pas donc envisageable.

3.1.2.3.4.3. Valorisation énergétique

L'incinération avec récupération d'énergie est la voie de traitement prépondérante pour le traitement des médicaments non utilisés (100 %), des déchets des activités de soins à risques infectieux (81 %), des produits chimiques des ménages (80,8 %) et des pneumatiques usagés (50,5 %). Elle reste assez importante pour les filières de traitement des lubrifiants (35,5 %) et pour la filière papier (32,7 %). En revanche, la filière des piles et accumulateurs ne destine quasiment aucun de ses déchets à cette voie de traitement (0,1 %) ; la filière des fluides frigorigènes et gaz fluorés (FFGF) n'en valorise aucun.

On constate que pour les filières traitant des produits considérés comme dangereux (tel que les filières MNU, DASRI et des déchets diffus spécifiques), la priorité n'est pas de préserver la fonctionnalité du produit ou la valeur de la matière, mais d'éliminer tout risque infectieux, toxicologique ou plus largement environnemental. La valorisation énergétique permettant d'éliminer le risque tout en récupérant de l'énergie, elle est ainsi la voie de traitement favorisée (> 80 % dans les trois cas).

3.1.2.3.4.4. Autres types de valorisation

Il n'y a que trois filières qui proposent un autre type de valorisation hors réutilisation, recyclage ou valorisation énergétique :

- la filière PU propose la valorisation en travaux publics (tel que les opérations de remblaiement et la construction des bassins d'infiltration ou de rétention d'eau avec des pneus usagés) ;
- la filière FFGF propose la régénération des fluides frigorigènes ;
- enfin la filière TLC propose l'effilochage, la création des chiffons d'essuyage et la fabrication des combustibles solides de récupération.

Pour les filières FFGF et PU, la voie de traitement envisagée est très significative (18,1 % et 10,6 % respectivement). Ceci souligne bien l'intérêt d'ouvrir plus encore le champ des voies traitement, par exemple à la valorisation fonctionnelle, la valorisation matière et la valorisation énergétique. En effet, d'autres voies existent et il convient de bien les prendre en compte dans l'analyse.

3.1.2.3.4.5. Élimination

La filière qui envoie le plus des déchets à l'élimination est celles des emballages industriels et commerciaux (26,3 %). Les autres filières y destinent seulement entre 0 et 20 %. La filière TLC génère très peu de déchets ultimes (1,5 %) et les filières PU, HU et MNU aucun.

Ces chiffres montrent que la fraction non valorisée est relativement faible pour la plupart des filières. C'est un résultat très encourageant car il signifie que les produits sont valorisés à hauteur de 80 % dans les filières REP.

3.1.2.3.4.6. Pertes

Seule la filière de traitement des piles et accumulateurs prend en compte dans son analyse les pertes de matière subies lors des opérations de traitement. Ces pertes sont pourtant bien présentes dans les autres filières et leurs opérations de traitement respectives. Il faudrait donc que cette information soit aussi comptabilisée pour mieux interpréter la performance réelle de chaque filière.

3.1.2.3.4.7. Synthèse

Cette étude permet de montrer qu'aucun mode de traitement commun n'est privilégié par toutes les filières étudiées. En effet, même si elles ont pour objectif de traiter leurs déchets selon la hiérarchie imposée par la législation (c.-à-d. prévention, préparation en vue de la réutilisation, recyclage, autre valorisation, notamment valorisation énergétique et élimination (Parlement Européen et Conseil de l'Union Européenne 2008)), les voies de valorisation dominantes peuvent être différentes d'un produit (ou d'une famille de produits) à l'autre. Le type filière (c.-à-d. matière ou produit) ainsi que la typologie de produit (p. ex. produit simple ou complexe, produit dangereux ou non) ont donc une influence sur la voie de traitement privilégiée et sur la performance du traitement.

Pour les produits dits complexes, la valorisation fonctionnelle devrait être la voie privilégiée. Cependant, on constate qu'ils ne sont pas adaptés à leur filière de traitement. En effet, des actions doivent être menées pour proposer des solutions permettant de mieux les valoriser et préserver ainsi le plus possible de leur valeur.

Enfin, le tableau 4 (renseigné à partir de données de l'ADEME) ne contient que des chiffres exprimant la performance technique de la filière (c.-à-d. les taux de traitement). En effet à ce jour, les objectifs réglementaires des filières REP sont généralement exprimés en termes de taux de collecte, taux de réutilisation et recyclage et taux de valorisation (voir §3.1.2.2.1). Néanmoins, ces indicateurs ne permettent d'apprécier ni

la qualité des extrants, ni la pertinence économique et environnementale du traitement.

3.2. Second axe de la politique de gestion des déchets : **prévenir la génération des déchets à partir d'une meilleure conception du produit** **en vue de son traitement en fin de vie**

Pour résoudre la problématique de gestion de déchets, il a été évoqué au début de ce chapitre (§ 2.3.2) que le deuxième axe emprunté par la législation est la prévention de la génération des déchets dès la phase de conception des produits (p. ex. par un allongement de leur durée de vie). Des réglementations incitent ainsi les fabricants à s'engager dans des démarches d'écoconception pour atténuer les impacts environnementaux de leurs produits tout au long de leur cycle de vie.

C'est autour de cette approche que s'articule ce chapitre. Dans un premier temps, les démarches de conception utilisées pour améliorer la gestion des déchets et celles visant à atténuer les impacts environnementaux des produits seront évoquées. Dans un deuxième temps, les méthodes d'évaluation des produits en conception sont présentées : l'évaluation de la valorisabilité d'une part (§ 3.2.2) et l'évaluation d'impacts environnementaux d'autre part (§ 3.2.3). Enfin, les outils de conception permettant d'établir un lien entre la conception du produit et sa fin de vie seront présentés.

3.2.1. Conception pour X

3.2.1.1. X ?

La *conception pour X* fait référence à l'utilisation d'une méthodologie formelle visant à optimiser un aspect spécifique d'un produit. X représente donc la stratégie de conception choisie et désigne le trait ou la caractéristique devant être améliorée par la (re)conception. X peut donc faire référence à des aspects comme la modularité, la fiabilité, la qualité, la sécurité, etc. Il peut aussi porter sur l'optimisation ou l'amélioration de l'une des phases du cycle de vie comme la fabrication (conception pour l'assemblage, l'inspection, la logistique, etc.), la vie du produit (conception pour la facilité d'utilisation, l'ergonomie, la maintenance, l'esthétique, etc.), et évidemment la fin de vie (conception pour le recyclage, la réutilisation, l'environnement, etc.). Ces dernières sont en plein essor et sont de mieux en mieux prises en compte par les concepteurs.

Les démarches de conception pour X sont généralement présentées sous forme de lignes directrices. Elles forment un ensemble de recommandations et de bonnes pratiques dont le but est de guider le concepteur et de rendre sa démarche de conception plus efficace en lui fournissant des conseils sur la façon d'atteindre l'objectif spécifique visé.

Les démarches de conception pour X et lignes directrices de conception-mêmes proposent des approches et des méthodes permettant de générer et d'appliquer des connaissances techniques pour contrôler, améliorer ou même développer les caractéristiques spécifiques d'un produit.

Ce travail de thèse étant centré sur la gestion des déchets (c.-à-d. de produits en fin de vie) et son amélioration dès la phase de conception dudit produit, on va s'intéresser notamment à deux types de démarches de conception pour X : la conception pour la fin de vie et l'écoconception (ou conception pour l'environnement).

3.2.1.2. Conception pour la fin de vie

La conception pour la fin de vie cherche à améliorer la gestion des déchets en concevant des produits qui favorisent l'accroissement de la performance de valorisation de la filière de traitement. Elle inclut ainsi l'ensemble des démarches de conception s'intéressant aux opérations de prétraitement (tels que la dépollution, le désassemblage ou le broyage), et celles centrées sur les différentes voies de traitement (p. ex. la conception pour la réutilisation, le recyclage ou l'enfouissement). Les démarches de conception pour la fin de vie sont présentées et définies dans le tableau 5 où quelques références d'études associées à ces démarches sont aussi renseignées.

Les différentes démarches de conception (et les lignes directrices associées) pourraient aussi être regroupées par voie de valorisation, selon qu'elles visent la préservation de la valeur fonctionnelle (totale ou partielle), matière ou énergétique. Cette vision sera privilégiée dans ces travaux et une proposition sera présentée dans le chapitre suivant.

Les démarches de conception centrées sur les opérations de traitement des déchets ne sont pas les seules à pouvoir améliorer le traitement en fin de vie du produit. En effet, les démarches pour prolonger la durée de vie peuvent améliorer la performance d'une ou plusieurs opérations de traitement en fin de vie (notamment pour la valorisation fonctionnelle du produit).

La gestion des déchets peut être fortement améliorée en réduisant la quantité générée ou en retardant la fin de vie des produits évitant ainsi de les remplacer par d'autres ; c'est la prévention. Assurer le prolongement de la durée de vie des produits ne peut se faire qu'en conception. Le produit peut dès lors être adapté pour faciliter les opérations de réparation, de réemploi, etc. de ses modules ou composants (voir Chapitre 1 § 3.4.2.3). Une deuxième option consiste à concevoir des produits à longue durée de vie. Les démarches de conception pour prolonger la durée de vie sont présentées et définies dans le tableau 6 avec quelques références d'études associées.

3.2.1.3. Conception pour l'environnement : l'écoconception

La norme NF X30-264 (AFNOR 2013) définit l'écoconception comme l'intégration systématique des aspects environnementaux dès la conception et le développement de produits (biens, services et systèmes) avec pour objectif la réduction des impacts environnementaux négatifs tout au long de leur cycle de vie, à service rendu équivalent ou supérieur. Cette approche vise ainsi à trouver le meilleur équilibre entre les exigences environnementales, sociales, techniques et économiques. Les enjeux de l'écoconception sont donc :

- environnementaux : réduction des impacts environnementaux sur tout le cycle de vie du produit ou du système de produits²² ;
- réglementaires : conformité et anticipation de la réglementation, maîtrise de la réglementation et capacité à l'anticiper pour réduire les coûts de mise en conformité ;
- économiques : optimisation des coûts associés à l'intégration des préoccupations environnementales, augmentation des bénéfices, satisfaction de l'attente du client, positionnement concurrentiel ;
- liés à l'innovation : en interne, recherche de nouvelles solutions par la prise en compte des contraintes du cycle de vie et robustesse de la démarche.

²² Un système de produits est un ensemble de processus élémentaires comportant des flux de produits et des flux élémentaires, remplissant une fonction définie, qui sert de modèle au cycle de vie d'un produit (ISO 2006a; 2006b).

Chapitre 2

Contexte et problématique

Démarche de conception pour X	Description de la démarche	Références
Conception pour la dépollution	La conception pour la dépollution vise à rendre plus efficace l'extraction des substances dangereuses pour éviter leur introduction dans les opérations de traitement ultérieures (broyage, tri, etc.). Elle se concentre sur le temps d'identification, la clarté et durabilité des consignes, et le temps de démontage.	(Pôle éco-conception 2015)
Conception pour l'assemblage, pour le désassemblage et pour le réassemblage	Cette approche a pour objectif principal de réduire les temps d'assemblage et de désassemblage pour rendre cette opération économiquement viable. Le concepteur doit prendre en compte des paramètres comme le temps d'identification, la séquence d'assemblage ou de désassemblage, la visibilité, l'accessibilité et la simplicité de démontage des composants et des liaisons.	(Abdullah, Yusoff, et Mohd Ripin 2006) (Bras 2007) (Alonso Movilla et al. 2013) (Wais, Mitrouchev, et Tollenaere 2014)
Conception pour le broyage	La conception pour le broyage étudie l'aptitude à la fragmentation d'un produit et pour que les fragments obtenus soient monomatériaux. Elle s'intéresse aussi à la réduction du temps et d'énergie nécessaires aux opérations de traitement.	(Pôle éco-conception 2015)
Conception pour le tri	La conception pour le tri vise à obtenir des taux de pureté élevés du flux de matière sortant, et à réduire ainsi les taux de refus. Ainsi, les possibilités de recyclage sont améliorées en garantissant la compatibilité chimique et physique de la matière. Le concepteur agit principalement sur le choix de matériaux. La performance de cette opération (c.-à-d. le tri) reste cependant fortement influencée par la qualité du broyat.	(Pôle éco-conception 2015)
Conception pour la remise à neuf	La conception pour la remise à neuf promeut la récupération de produits ou de composants n'ayant pas souffert d'une détérioration excessive, pour les remettre en état et les réutiliser dans un deuxième cycle de vie.	(Marconi et al. 2017) (Lu et al. 2018)
Conception pour le reconditionnement (remanufacturing)	La conception pour le reconditionnement cherche à permettre aux produits, composants ou pièces nécessitant des réparations plus complexes que celles de la remise à neuf d'être valorisés fonctionnellement. Elle s'intéresse à l'évaluation de la remanufacturabilité et à la reconception du produit (architecture, liaisons, matériaux, etc.), à l'amélioration de l'efficacité de l'opération de reconditionnement (démontage, inspection, nettoyage, reconditionnement, réassemblage, etc.) et des technologies de traitement ainsi que de la prise en compte de la viabilité environnementale et économique du traitement.	(Zwolinski et Brissaud 2008) (T. Zhang et al. 2010) (Hatcher, Ijomah, et Windmill 2011) (Tchertchian, Millet, et Korchi 2012) (Hatcher, Ijomah, et Windmill 2013) (S. S. Yang, Ong, et Nee 2016)
Conception pour la montée en gamme (upgrade)	La conception pour la montée en gamme vise non seulement à mettre à niveau les fonctionnalités du produit mais à en ajouter d'autres pour satisfaire les besoins du client et prolonger ainsi la durée de vie du produit.	(Ishigami et al. 2003) (O. Pialot et Millet 2014) (Agrawal, Atasu, et Ülku 2016) (Aziz et al. 2016) (Olivier Pialot, Millet, et Bisiaux 2017)
Conception pour la réaffectation (repurposing)	Lorsque la valorisation fonctionnelle directe d'un produit ou d'un module n'est pas économiquement ou techniquement réalisable, la conception pour la réaffectation cherche à identifier de nouvelles fonctions ou utilisations.	(Bobba et al. 2018) (Coughlan, Fitzpatrick, et McMahon 2018) (Canals Casals, Barbero, et Corchero 2019)
Conception pour le recyclage	Il s'agit d'une approche centrée sur les paramètres de conception assurant la meilleure performance de traitement (c.-à-d. une meilleure désagrégation des matériaux incorporés dans le produit) pour assurer la rentabilité de l'opération de traitement.	(Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007) (M. Reuter et al. 2014)
Conception pour l'incinération	Lorsque ni la valorisation fonctionnelle, ni la valorisation matière ne sont possibles, la conception pour l'incinération vise à rendre la combustion des déchets la plus efficace. Le concepteur choisit alors les matériaux dont l'inflammabilité, le pouvoir calorifique et la faible toxicité permettent d'accroître la performance du centre d'incinération de la filière de traitement associée.	(Pôle éco-conception 2015)
Conception pour l'enfouissement	La conception pour l'enfouissement a pour but de réduire au plus l'impact environnemental de cette voie de traitement. La rareté, la biodégradabilité et la toxicité des matériaux font ainsi parti des critères à prendre en compte en conception.	(Pôle éco-conception 2015)

Tableau 5. Démarches de conception pour la fin de vie

Démarche de conception pour X	Description de la démarche	Références
Conception pour la durée de vie	La conception pour la durée de vie cherche à ce que la durée de vie de ses composants soit du même ordre que celle du produit pour limiter les défaillances. Pour certains composants à haute valeur ajoutée, il est aussi envisageable de prolonger leur durée de vie suffisamment pour les intégrer à nouveau dans un autre produit neuf, reconditionné ou comme composant de rechange.	(Vezzoli et Manzini 2008) (ADEME et al., s. d.)
Conception pour la fiabilité	La conception pour la fiabilité vise à augmenter la durée de vie du produit en améliorant sa qualité et sa sécurité, avec pour conséquence de réduire les pannes inattendues et les coûts de maintenance associés.	(Carter 1986) (Stapelberg 2009) (T. Zhang et al. 2010)
Conception pour la modularité	La conception pour la modularité vise à donner au produit une configuration modulaire. Elle est incluse dans plusieurs démarches car un produit modulaire est plus facilement assemblé ou désassemblé ²³ . Ceci permet donc d'améliorer certaines opérations de traitement telles que la maintenance, la dépollution, la valorisation fonctionnelle et même la valorisation matière.	(Abdullah, Yusoff, et Mohd Ripin 2006) (Umeda et al. 2008) (Umeda, Fukushige, et Tonoike 2009) (Tchertchian, Millet, et Pialot 2011) (Agrawal, Atasu, et Ülku 2016)
Conception pour la maintenance	La conception pour la maintenance a pour objectif de s'assurer que le produit peut être entretenu sans difficulté tout au long de son cycle d'usage pour un coût raisonnable.	(Abdullah, Yusoff, et Mohd Ripin 2006) (Bras 2007) (Rui Liu et Raja R.A. Issa 2014)
Conception pour la réparabilité	La conception pour la réparabilité (c.-à-d. la facilité de réparation) vise à prolonger la durée de vie du produit en le rendant plus facile à réparer, et en assurant ainsi un traitement en fin de vie économiquement viable. Parmi les leviers d'action du concepteur, on trouve l'arrangement et la facilitation du démontage et du remontage des composants les plus fragiles ou les moins fiables, la conception des composants standardisés pour faciliter le remplacement des pièces endommagées et même l'équipement des produits d'un système de diagnostic automatique des défaillances.	(Vezzoli et Manzini 2008)
Conception pour l'adaptabilité	La conception pour l'adaptabilité a pour but de prolonger la durée de vie d'un produit en le rendant capable d'être modifié, adapté ou reconfiguré au cours de la phase d'exploitation pour répondre aux évolutions des exigences, et éviter ainsi qu'il devienne obsolète.	(J. Zhang, Xue, et Gu 2015) (Martinez et Xue 2016)
Conception pour plusieurs cycles de vie	La conception en vue de plusieurs générations de cycles de vie est une approche qui cherche à prolonger la vie d'un produit ou d'une matière sur plusieurs cycles de vie. Elle vise donc à rendre le produit, ses composants et ses matériaux plus robustes, plus réparables, plus évolutifs, plus adaptables, plus flexibles, plus compatibles et plus faciles à entretenir.	(Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Aziz et al. 2016)

Tableau 6. Démarches de conception pour prolonger la durée de vie

²³ Notons ici que le désassemblage n'est pas la stricte opération réciproque de l'assemblage.

Cette démarche de conception est très utilisée dans la pratique et largement étudiée dans la littérature (Bevilacqua, Ciarapica, et Giacchetta 2008; Telenko, Seepersad, et Webber 2008).

Evidemment basée sur le cycle de développement du produit rappelé dans le Chapitre 1 (§ 3.2), la norme NF X30-264 (AFNOR 2013) propose une méthodologie d'écoconception découpée en cinq phases :

- 1. Planification de la démarche** Intégrée à l'avant-projet, cette phase a pour objectif la préparation amont de la démarche d'écoconception. Elle s'articule selon l'analyse de l'existant, le choix d'un produit de référence, la réalisation d'un bilan environnemental, la définition de la stratégie d'écoconception et enfin l'élaboration du plan de travail de la démarche d'écoconception.
- 2. Conduite du projet** Cette phase correspond au cœur du processus de conception, de l'expression du besoin à la conception détaillée (voir Chapitre 1, § 3.2.3 à 3.2.5). Les critères environnementaux sont pris en compte tout au long du processus. Il est alors nécessaire d'identifier en amont où seront intégrés les critères environnementaux.
- 3. Industrialisation et homologation** L'industrialisation a pour but de fabriquer un prototype fonctionnel qui permettra de valider les solutions d'écoconception retenues et les fournisseurs choisis pour chacun des matériaux et composants (voir aussi Chapitre 1, § 3.2.6 et § 3.2.7). Une fois l'ensemble des indicateurs de performance (indicateurs de suivi du projet) validés, une homologation est réalisée.
- 4. Commercialisation** Cette phase intègre en plus de la simple mise sur le marché, l'élaboration (i) des notices de vente et des conditions d'utilisation, et (ii) du programme de communication (interne et externe). C'est lors de cette étape que se fait le retour du client qui contribue à l'amélioration continue du système.
- 5. Bilan de la démarche d'écoconception** Cette phase permet d'évaluer et de capitaliser les résultats de la démarche. Elle comprend la revue du produit et l'analyse du retour d'expérience, et la capitalisation de la démarche d'écoconception.

3.2.2. Évaluer la performance potentielle de valorisation d'un produit en conception

Les méthodes utilisées pour évaluer la performance de valorisation d'une filière de traitement ont été identifiées précédemment (voir § 3.1.2). Une analyse similaire est faite ici pour les méthodes d'évaluation de la valorisabilité d'un produit.

3.2.2.1. Notion de valorisabilité d'un produit

La valorisabilité d'un produit est la grandeur théorique servant à évaluer (généralement dès sa conception-même) la performance potentielle de valorisation du produit par la filière de traitement qu'il intégrera en fin de vie. Il convient donc de bien distinguer la nuance sémantique existant entre les termes valorisation et valorisabilité. La première concerne la *valorisation réelle* d'un ensemble des déchets dans un période de temps déterminé, alors que la deuxième concerne la *valorisation potentielle* d'un produit, c'est-à-dire son degré d'intégration (théorique) par la filière.

La notion de valorisabilité a d'abord été introduite dans l'industrie automobile pour le traitement des véhicules en fin de vie. Cette notion a ensuite été déclinée et adaptée à d'autres types de produits. Dans le cas particulier des véhicules routiers, la directive 2005/64/CE définit la valorisabilité comme le potentiel de valorisation des composants ou matériaux issus d'un véhicule hors d'usage (Parlement Européen et Conseil de l'Union Européenne 2005). La norme ISO 22628 la définit comme l'aptitude des composants, des matériaux ou des deux à être retirés du flux de fin de vie pour être valorisés (ISO 2002). Concernant les DEEE, une définition similaire est proposée dans le rapport technique IEC/TR 62635 (IEC 2012) : c'est la capacité d'un déchet à être

valorisé, sur la base de procédés et technologies réellement mises en œuvre sur le terrain. Une définition plus complète est proposée par Mathieux *et al.* : la valorisabilité est la capacité du produit, de ses composants et de ses matériaux constitutifs, à être réutilisés, recyclés ou valorisés sous forme d'énergie (Mathieux, Froelich, et Moszkowicz 2008).

La notion de recyclabilité peut s'adjoindre aux définitions précédentes car elle caractérise le potentiel de valorisation *matière*. Villalba *et al.* la définissent ainsi comme la capacité d'un matériau à récupérer ses propriétés originelles (Villalba *et al.* 2002). Pour Maris *et al.*, c'est la capacité d'un produit en fin de vie et d'une filière de traitement de référence à récupérer les matériaux d'une part, et à recouvrer leurs propriétés techniques et leur valeur économique d'autre part (Maris et Froelich 2013).

La valorisabilité totale du produit en fin de vie est généralement liée à la réutilisabilité, la recyclabilité et la valorisabilité énergétique. Cependant, les notions de valorisabilité fonctionnelle, matière et énergétique pourraient être plus pertinentes puisqu'elles couvrent d'autres voies de traitement (p. ex. la montée en gamme, la réaffectation, la production de combustibles solides de récupération, etc.) qui pourraient être ignorées dans le schéma traditionnel des voies de traitement en fin de vie (c.-à-d. réutilisation, recyclage et incinération avec récupération d'énergie).

À partir des définitions précédentes, nous proposons de définir la valorisabilité d'un produit comme *la capacité conjointe du produit en fin de vie et de la filière de traitement associée à recouvrer les propriétés techniques et la valeur économique du produit complet, de ses composants et/ou de ses matériaux constitutifs. Les opérations de valorisation fonctionnelle d'abord, matière ensuite et énergétique enfin (dont la pertinence environnementale doit être validée pour chacune) suivent donc une logique d'échelle et de hiérarchisation.*

Le critère environnemental est primordial car la valorisation des produits en fin de vie ne vise pas seulement la récupération de valeur, mais aussi la réduction de l'impact environnemental lié à l'extraction des matières premières et à la fabrication de nouveaux produits. En effet, une voie de valorisation ne devrait pas être empruntée si elle est globalement plus nocive pour l'environnement que la non-valorisation des déchets.

3.2.2.2. Méthodes de référence pour l'évaluation de la valorisabilité d'un produit

La première méthode de référence pour évaluer la valorisabilité des produits est proposée par la norme ISO 22628 (ISO 2002). Elle définit le taux de recyclabilité (respectivement de valorisabilité) comme la fraction massique d'un véhicule neuf pouvant être *potentiellement* recyclée, réutilisée ou les deux (respectivement *potentiellement* réutilisée, recyclée, valorisée énergétiquement ou les trois). Les masses recyclables (réutilisables, recyclables ou les deux) et valorisables (réutilisables, recyclables et/ou valorisables énergétiquement) sont définies à partir des propriétés des matériaux et des composants, de la structure du véhicule et des considérations sur les technologies de traitement reconnues (c.-à-d. testées avec succès au moins à l'échelle du laboratoire). Il faut noter que la prise en compte des technologies qui n'existent qu'à l'échelle du laboratoire représente un calcul purement théorique dont les résultats peuvent être très éloignés de la réalité de la filière.

La norme ISO 22628 définit mathématiquement le taux de valorisabilité (en pourcent) d'un véhicule comme suit :

$$R_{COV} = \frac{m_p + m_D + m_M + m_{TR} + m_{Te}}{m_V} \times 100$$

avec

m_D : masse des matériaux enlevés lors de la phase de démontage

m_M : masse des métaux triés lors de la phase de tri

m_P : masse des matériaux enlevés lors du prétraitement

m_{Te} : masse des résidus non-métalliques valorisables énergétiquement

m_{TR} : masse des résidus non-métalliques recyclables

m_V : masse totale du véhicule

R_{COV} : taux de valorisabilité

La deuxième méthode de référence est proposée par le rapport technique IEC/TR 62635 (IEC 2012) concerne l'industrie des équipements électriques et électroniques (EEE). Le taux de recyclabilité (respectivement valorisabilité) s'exprime par le rapport massique des composants recyclables du produit (respectivement valorisables) et du produit complet. La masse des composants est pondérée par le taux de recyclage (respectivement de valorisation) (voir § 3.1.2.2.1) d'un scénario de fin de vie.

Le rapport technique IEC/TR 62635 définit mathématiquement le taux de valorisabilité (en pourcent) d'un équipement électrique et électronique comme suit :

$$R_{COV} = \frac{\sum (m_i \times RVR_i)}{m_{EEE}} \times 100$$

avec

m_{EEE} : masse totale de l'EEE

m_i : masse du $i^{\text{ème}}$ composant

R_{COV} : taux de valorisabilité

RVR_i : taux de valorisation du $i^{\text{ème}}$ composant dans le scénario de fin de vie correspondant

Ces deux méthodes définissent la valorisabilité des produits à partir des taux de recyclabilité et de valorisabilité. Cependant, la méthode IEC/TR 62635 est plus précise car elle pondère les calculs par les taux *réels* de valorisation de la filière de traitement considérée.

Les taux de recyclabilité et de valorisabilité sont des indicateurs pertinents puisqu'ils permettent d'évaluer dans quelle mesure les composants et les matériaux d'un produit pourront potentiellement être intégrés par les différentes voies de traitement (c'est-à-dire réutilisation, recyclage et valorisation énergétique).

Les indicateurs massiques sont fréquemment utilisés pour évaluer si les fabricants respectent les objectifs de recyclabilité et de valorisabilité fixés par la législation. Toutefois, l'évaluation de la valorisabilité utilisant la préservation de la masse du produit comme seul critère ne garantit pas une conception efficace (IEC 2012). En effet, des problématiques telles que la perte de qualité des matériaux (p. ex. due à des impuretés ou même à un vieillissement du matériau), les impacts environnementaux associés aux procédés de traitement ou la perte de la valeur économique ne sont pas pris en compte.

3.2.2.3. Corrélation entre valorisabilité et valorisation.

État des lieux

Le niveau de corrélation existant entre l'évaluation de la valorisabilité du produit (performance théorique calculée par les concepteurs) et la valorisation en fin de vie (performance réelle calculée par les acteurs de la filière de traitement) peut être illustré par la filière véhicules hors d'usage (VHU). Depuis les années 2000, cette

industrie a en effet été soumise à des réglementations environnementales de plus en plus exigeantes. Elle est donc aujourd'hui l'une des filières de traitement des produits en fin de vie les mieux développées. L'ensemble des acteurs et des opérations de traitement intégrant cette filière sont représentés à la figure 25.

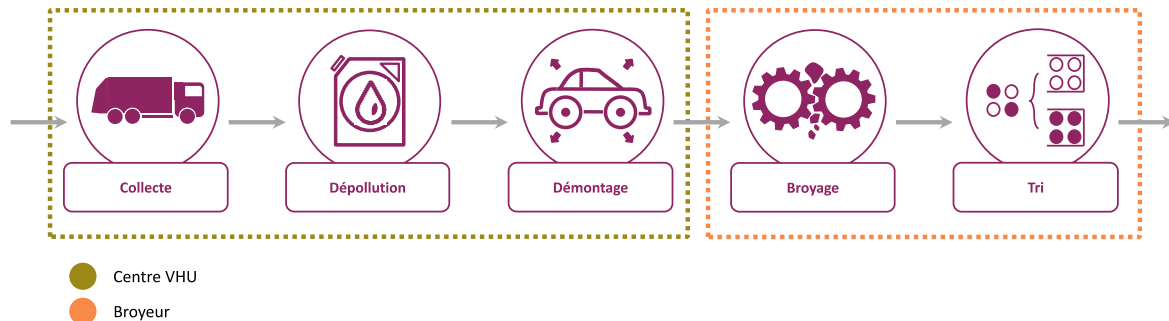


Figure 25. Représentation schématique de la filière VHU.

On rappelle que la directive européenne 2000/53/CE (Parlement Européen et Conseil de l'Union Européenne 2000) impose ainsi pour tous les véhicules hors d'usage (voir § 3.1.2.2.1) :

- un taux moyen de réutilisation et recyclage de 85 % minimum en masse par véhicule et par an ;
- et un taux moyen de valorisation de 95 % minimum en masse par véhicule et par an.

Pour répondre aux objectifs de la norme, les constructeurs automobiles calculent les taux de recyclabilité et de valorisabilité de leurs produits en utilisant la norme ISO 22628 (ISO 2002) (voir § 3.2.2.2). Ces définitions différencient clairement les taux de recyclabilité (et de réutilisabilité) et de valorisabilité (calculs théoriques), des taux de réutilisation et recyclage, et de valorisation (calculs réels). En conséquence, les taux calculés par l'industrie automobile peuvent ne pas répondre aux objectifs de la norme si les filières ne sont pas complètement développées.

Les résultats du rapport ADEME pour l'année 2013 sont présentés à la figure 26 (ADEME 2015c). Les fabricants automobiles déclarent être conformes aux objectifs imposés par la législation. Cependant, on constate que les taux de recyclage et de valorisation réellement atteints sur le terrain sont bien inférieurs à ceux imposés par la réglementation. Seuls 211 couples de centre VHU agréé et broyeur sur 1199 (soit 17,6 %) atteignent réellement l'objectif de 85 % de taux de réutilisation et de recyclage, et 100 sur 1199 (soit 8,3 %) l'objectif de 95 % de taux de réutilisation et de valorisation.

Un écart est donc constaté entre le taux de valorisabilité du produit (performance théorique calculée par l'équipe de conception) et son taux de valorisation (performance réelle obtenue par la filière). Il est donc évident qu'une meilleure connaissance du devenir des constituants et le cas échéants des composants doit être capitalisée, actualisée et mise à disposition de l'équipe de conception pour que le calcul des taux de valorisabilité soit plus représentatif de la réalité.

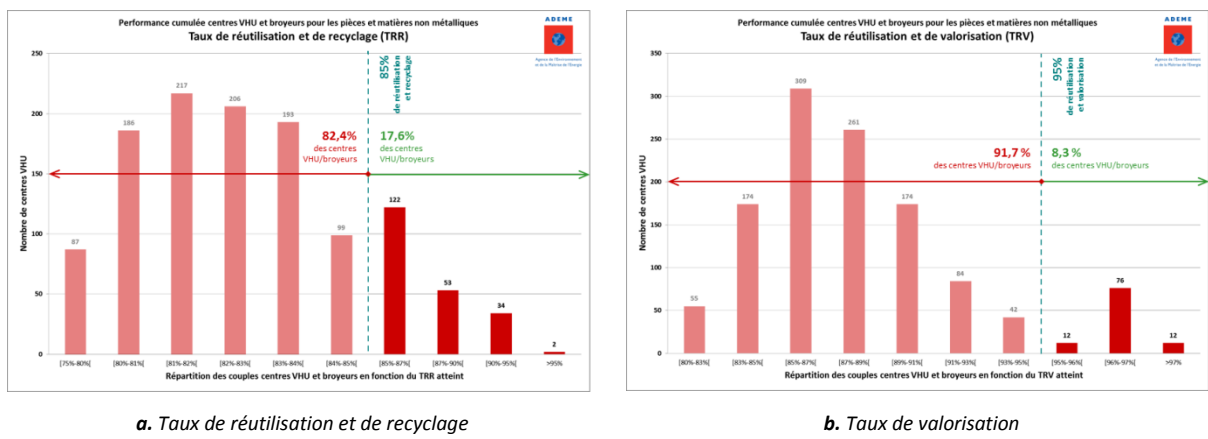


Figure 26. Performances des acteurs de la filière VHU (couples : Centre VHU (dépollution et démontage) + Broyeur) en 2013

3.2.3. Évaluer les impacts environnementaux d'un produit

3.2.3.1. Notions d'impact environnemental et d'analyse du cycle de vie

L'expression *impact environnemental* désigne toute conséquence anthropique (c.-à-d. due à l'activité humaine sur l'environnement). Il prend donc en compte toute modification de l'environnement (négative comme positive) issue partiellement ou totalement des activités, produits ou services humains.

Les impacts environnementaux sont mesurés à partir d'une analyse du cycle de vie (ACV). C'est une méthode permettant d'évaluer les impacts potentiels sur l'environnement d'un système incluant l'ensemble des activités associées (c.-à-d. depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination des déchets). Standardisée par les normes ISO 14040 (ISO 2006a) et ISO 14044 (ISO 2006b), cette méthode consiste à établir le bilan des consommations de ressources naturelles et d'énergie, et d'émissions dans l'environnement (air, eau, sol) du produit ou service analysé. Ces flux de matières et d'énergies sont ensuite agrégés pour quantifier les indicateurs d'impacts sur l'environnement (ADEME 2002). Les études d'ACV comprennent traditionnellement quatre phases (voir figure 27).

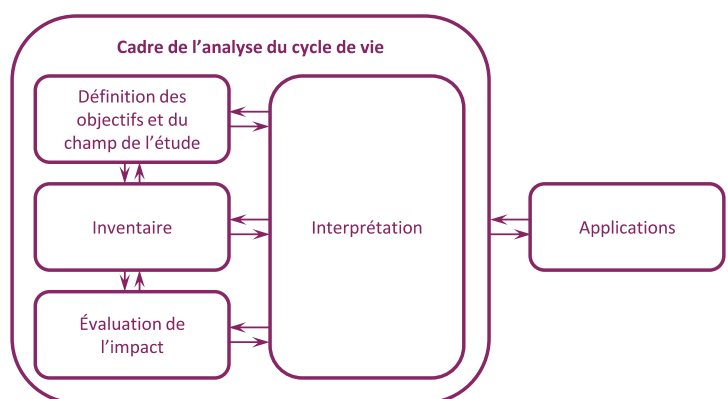


Figure 27. Phases d'une ACV (ISO 2006a; 2006b)

La norme ISO 14044 définit ces quatre phases (ISO 2006b) :

- **Définition des objectifs et du champ de l'étude** Les objectifs et le champ de l'étude (c.-à-d. la définition du système, de l'unité fonctionnelle, des règles d'affectation, des hypothèses, etc.) sont clairement définis en cohérence avec l'application envisagée.
- **Inventaire** L'inventaire des flux de matières et d'énergies entrants et sortants, associés aux étapes du cycle de vie rapporté à l'unité fonctionnelle retenue, est dressé. Les données spécifiques (ou primaires) peuvent être complétées par des données génériques (ou secondaires), issues de la bibliographie ou de calculs, lorsque les premières ne suffisent pas ou lorsqu'elles ne sont pas accessibles. Trois grandes étapes se distinguent : le recueil et le calcul des données, et l'affectation.
L'inventaire est généralement effectué à l'aide d'un logiciel d'ACV (p. ex. SimaPro, GaBi, Umberto, etc.). C'est l'étape la plus délicate de l'analyse car les risques d'erreurs sont importants. Elle requiert donc une attention particulière et un contrôle extérieur.
- **Évaluation de l'impact** Les impacts potentiels sont évalués à partir des flux de matières et d'énergie identifiés ainsi que de la méthode de caractérisation et des indicateurs sélectionnés. Deux niveaux de caractérisation sont possibles :
 - le premier correspond aux catégories intermédiaires (*midpoint categories*) ou indicateurs d'impacts potentiels. Ce sont les indicateurs les plus utilisés et reconnus à ce jour (ADEME 2019a) ;
 - le second niveau est celui des indicateurs de dommages potentiels (*damage category* ou *endpoint category*). Elle regroupe les dommages sur différents sujets à protéger tels que la santé humaine, les écosystèmes et les ressources naturelles. (Jolliet, Saadé, et Crettaz 2010). Ces méthodes facilitent la compréhension et l'utilisation des résultats en raison du faible nombre d'indicateurs. Néanmoins, ils sont moins reconnus du fait de leur faible robustesse scientifique (ADEME 2019a).La figure 28 met en relation ces deux niveaux dans le cadre général de l'évaluation de l'impact du cycle de vie.
- **Interprétation** Elle permet de valider que les résultats obtenus répondent aux objectifs fixés. La robustesse des résultats (c.-à-d. la variabilité des résultats due aux incertitudes) est alors aussi évaluée. Cette phase comprend l'identification des enjeux significatifs, la vérification de l'étude et l'identification des conclusions, des limitations et des recommandations.

La première et la dernière phase (c.-à-d. la définition des objectifs et du champ de l'étude, et l'interprétation) constituent le cadre de l'étude, tandis que les deux autres phases produisent des informations sur le système de produits. Les résultats des phases d'inventaire et d'évaluation de l'impact doivent être interprétés selon les objectifs et le champ de l'étude. Cette analyse doit inclure une évaluation et un contrôle de sensibilité des intrants, des extrants et des choix méthodologiques significatifs pour interpréter l'incertitude des résultats.

3.2.3.2. Méthodes d'évaluation de référence des impacts du cycle de vie d'un produit

Plusieurs méthodologies d'évaluation des impacts du cycle de vie ont été développées. À ce jour, la méthode d'évaluation de référence est celle proposée par le Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne ou JRC (*Joint Research Centre*). Elle a été publiée en 2010 sous le nom de Système international de données du cycle de vie (ILCD : *International reference Life Cycle Data system*) comme une réponse à l'absence d'un cadre complet d'exigences pour les méthodes d'évaluation de l'impact du cycle de vie.

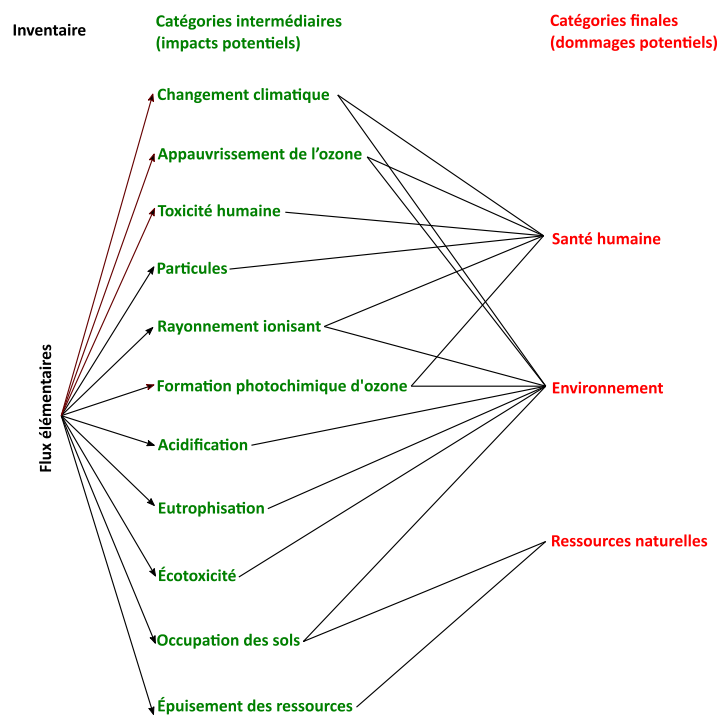


Figure 28. Cadre général de l'évaluation de l'impact du cycle de vie (catégories d'impact)
(European Commission - JRC - IES 2010a)

La méthode ILCD est présentée sous la forme d'un manuel (*ILCD Handbook*) (European Commission - JRC - IES 2010b; 2010a). Elle s'appuie sur les normes internationales portant sur l'ACV et propose une série de documents techniques détaillés qui fournissent des conseils sur les bonnes pratiques en matière d'analyse du cycle de vie dans les entreprises et dans les gouvernements. La démarche proposée est divisée en quatre étapes : choix des catégories d'impact et classification, caractérisation, normalisation et pondération. (La réalisation des deux dernières étapes est optionnelle.)

Dans le cadre de la recommandation de la Commission Européenne sur l'utilisation de méthodes communes pour mesurer et communiquer les performances environnementales des produits et des organisations (2013/179/EU), le JRC a proposé une méthode d'évaluation de l'impact du cycle de vie de l'empreinte environnementale (EF LCIA pour ses seigles en anglais). Elle est dérivée du système international de données du cycle de vie (ILCD). (Fazio et al. 2018)

La méthode EF LCIA et la méthode ILCD présentent quelques différences par rapport aux références initiales des modèles, ainsi que dans les choix et hypothèses faits lors de l'élaboration des facteurs de caractérisation pour différentes catégories d'impact (Fazio et al. 2018).

Les indicateurs utilisés pour évaluer les différentes catégories d'impact sont présentés dans le tableau 7. Les indicateurs recommandés par la méthode EF LCIA ont été préférés à ceux de la méthode ILCD car ils constituent la dernière recommandation de la Commission Européenne. Les indicateurs associés aux catégories de dommages ne sont pas présentés car ils ne sont pas intégrés dans la méthode EF LCIA.

Catégorie d'impact	Indicateur	Sigle anglais en usage (Dénomination)	Description	Unité	Modèle recommandé
Changement climatique	Potentiel de réchauffement climatique	GWP (<i>global warming potential</i>)	Mesure le forçage radiatif d'un kilogramme d'une substance donnée par rapport à un kilogramme de CO ₂ dans un horizon temporel de 100 ans. (Intergovernmental Panel on Climate Change 2014; European Commission - JRC - IES 2010a)	kg CO ₂ eq	IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change 2014)
Appauvrissement de l'ozone	Potentiel de déplétion d'ozone	ODP (<i>ozone depletion potential</i>)	Évalue la capacité relative d'un produit chimique à détruire l'ozone (World Meteorological Organization 2015). C'est une mesure relative destinée à représenter la variation globale d'ozone due à l'émission étudiée par rapport à la variation globale d'ozone due à une molécule de référence (CFC-11) (Solomon et al. 1992).	kg CFC-11 eq	WMO (World Meteorological Organization 1999)
Toxicité humaine	Potentiel de toxicité humaine	HTP (<i>human toxicity potential</i>)	La catégorie toxicité humaine s'intéresse aussi bien aux effets cancérogènes qu'aux effets non-cancérogènes. Le CTU _h (unité toxique comparative pour la santé humaine) exprime l'augmentation estimée de la morbidité dans la population humaine totale par unité de masse d'un produit chimique émis (cas par kilogramme) (European Commission - JRC - IES 2010a).	CTU _h	USEtox (Rosenbaum et al. 2008)
Particules	Incidence de maladies		Évalue les effets sur la santé humaine associés à l'exposition aux particules PM _{2,5} pour des émissions extérieures et intérieures, primaires et secondaires et dans les zones urbaines et rurales. L'indicateur intermédiaire mesure la variation de la mortalité due aux émissions de ces particules (Fazio et al. 2018).	Incidence de maladies / kg PM _{2,5} émis	UNEP (UNEP 2016)
Rayonnement ionisant	<u>Santé humaine</u> Potentiel de rayonnement ionisant	IRP (<i>ionizing radiation potential</i>)	Estime l'effet des émissions radioactives d'un matériau ou d'une substance sur la santé humaine. L'impact des rayonnements ionisants sur la population est déterminée par rapport à l'uranium 235 (ESU-services 2018).	kBq U ²³⁵ eq	(Frischknecht et al. 2000)
	<u>Écosystèmes</u> Potentiel d'écotoxicité	ETP (<i>ecotoxicity potential</i>)	Estime la fraction potentiellement affectée des espèces (PAF de l'anglais <i>Potentially Affected Fraction</i>) intégrée dans le temps et du volume par unité de masse d'un radionucléide émis (PAF·m ³ ·année/kg) (European Commission - JRC - IES 2010a).	CTU _e (Unité Toxique Comparative pour les écosystèmes)	USEtox (Rosenbaum et al. 2008)
Formation photochimique d'ozone	Potentiel de création d'ozone photochimique	POCP (<i>photochemical ozone creation potential</i>)	Évalue la contribution de chaque substance pour former de l'ozone dans un volume d'air, avec le composé organique volatil non méthanique (NMVOC pour ses seigles en anglais) comme substance de référence (Struijs et al. 2009).	kg NMVOC eq	LOTOS-EUROS (van Zelm et al. 2008)

Chapitre 2

Contexte et problématique

Catégorie d'impact	Indicateur	Sigle anglais en usage (Dénomination)	Description	Unité	Modèle recommandé
Acidification	Dépassement accumulé	AE (accumulated exceedance)	Caractérise la variation du dépassement des charges critiques de la zone sensible dans les écosystèmes terrestres et les principaux écosystèmes d'eau douce, dans lesquels les substances acidifiantes se déposent (European Commission - JRC - IES 2010a).	mol H ₂ O eq	Dépassement accumulé (Seppälä et al. 2006; Posch et al. 2008)
Eutrophisation	<u>Terrestre</u> Dépassement accumulé	AE (accumulated exceedance)	Caractérise le changement de dépassement des charges critiques de la zone sensible, dans laquelle les substances eutrophisantes se déposent (European Commission - JRC - IES 2010a). Dans le cas d'une eutrophisation terrestre, la sensibilité de l'écosystème est quantifiée par la charge critique d'azote nutritif. (Seppälä et al. 2006; Posch et al. 2008)	mol N eq	Dépassement accumulé (Seppälä et al. 2006; Posch et al. 2008)
	<u>Aquatique (eau fraîche)</u> Équivalents P		Évalue la fraction des nutriments atteignant l'extrémité d'eau douce à partir de la concentration en phosphore par an en kg/m ³ (Struijs et al. 2009).	kg P eq	EUTREND (Struijs et al. 2009)
	<u>Aquatique (eau marine)</u> Équivalents N		Évalue la fraction des nutriments atteignant l'extrémité d'eau marine à partir de la concentration en azote par an en kg/m ³ (Struijs et al. 2009).	kg N eq	EUTREND (Struijs et al. 2009)
Écotoxicité	<u>Eau fraîche</u> Potentiel d'écotoxicité	ETP (ecotoxicity potential)	(voir Rayonnement ionisant des Ecosystèmes)	CTUe	USEtox (Rosenbaum et al. 2008)
Occupation des sols	Indice de qualité du sol	(soil quality index)	Construit à partir de l'agrégation de quatre indicateurs : production biotique, résistance à l'érosion, filtration mécanique et régénération des eaux souterraines (Fazio et al. 2018).	Adimensionnel	EC-JRC (Fazio et al. 2018) (basé sur LANCA (Bos et al. 2016))
Épuisement des ressources	<u>Minéraux et métaux</u> Potentiel d'appauvrissement abiotique des éléments	ADP (abiotic depletion potential)	Le modèle de caractérisation est fonction des réserves naturelles ultimes (stocks/dépôts dans l'environnement) des ressources abiotiques combinées à leurs taux d'extraction. Le facteur de caractérisation (ADP) est déterminé pour chaque extraction d'éléments et est une mesure relative dont l'épuisement de l'élément antimoine sert de référence. (Lauran Van Oers et Guinée 2016)	kg Sb eq	CML (Guinée et al. 2002) (L. Van Oers et al. 2002)
	<u>Sources d'énergie</u> Potentiel d'appauvrissement abiotique des combustibles fossiles	ADP (abiotic depletion potential)	Les ressources de la catégorie d'impact des combustibles fossiles sont des combustibles comme le pétrole, le gaz naturel et le charbon, qui sont tous des sources d'énergie et sont supposés être mutuellement substituables. Par conséquent, le stock de combustibles fossiles est formé par la quantité totale de combustibles fossiles, exprimée en mégajoules (MJ). (Lauran Van Oers et Guinée 2016)	MJ	CML (Guinée et al. 2002) (L. Van Oers et al. 2002)

Catégorie d'impact	Indicateur	Sigle anglais en usage (Dénomination)	Description	Unité	Modèle recommandé
	<u>Eau</u> Potentiel de privation de l'utilisateur	<i>(user deprivation potential)</i>	L'approche évalue la quantité d'eau restante disponible par zone après que la demande des humains et des écosystèmes aquatiques a été satisfaite. En d'autres termes, elle quantifie l'équivalent surface-temps nécessaire pour reconstituer l'eau consommée, sans priver les autres utilisateurs. La consommation d'eau est pondérée selon la privation. (Fazio et al. 2018)	kg monde éq. privé	AWARE (UNEP 2016)

Tableau 7. Catégories d'impacts intermédiaires et indicateurs (basé sur (Fazio et al. 2018)).

3.2.4. Développement d'outils de conception intégrant la notion de fin de vie

Les méthodes d'évaluation de la performance potentielle de valorisation (voir § 3.2.2) et d'évaluation des impacts environnementaux d'un produit (voir § 3.2.3) ont pour but de représenter la réalité de son traitement en fin de vie. En conception, cette représentation pourrait être un critère de prise de décision. En effet, le concepteur peut par exemple s'en servir pour identifier les matériaux les moins recyclés ou ceux dont le traitement est le plus impactant pour mieux orienter sa démarche d'écoconception.

Le problème principal réside cependant dans l'interprétation de cette évaluation. En effet, les indicateurs utilisés sont souvent des paramètres de natures différentes (p. ex. indicateurs d'impacts environnementaux) et leur résultat peut varier d'une étude à l'autre selon le périmètre d'analyse considéré (p. ex. les taux de valorisation).

Le développement d'outils de conception a pour but de simplifier la démarche en réduisant les problématiques évoquées ci-dessus. Dans ce cadre, quelques outils de conception permettant d'établir un lien entre la phase de conception et la fin de vie ont été identifiés dans la littérature :

- L'Université Technique de Vienne a développé *ecodesign pilot* (Wimmer et Züst 2001). C'est un outil d'aide à la décision en conception permettant de trouver des stratégies de conception adaptées au type de produit. L'outil définit les typologies de produit suivantes : intensif en consommation de matières premières, intensif en impacts lors de la production, intensif en besoin de transport, intensif en impacts lors de l'utilisation et intensif en impacts lors de l'élimination. Selon le type de produit et la stratégie de conception choisie par l'utilisateur, l'outil propose un questionnaire avec des actions et des listes de contrôle permettant d'identifier celles à réaliser en priorité (en fonction des informations définies par l'utilisateur).
- Ardente *et al.* ont développé l'outil ENDLESS (Ardente, Beccali, et Cellura 2003). Ce modèle intègre une méthode de prise de décision multi-attributs et permet de calculer un *Indice Global de Recyclage* à partir d'un ensemble d'indicateurs énergétiques, environnementaux, techniques et économiques. La pondération des paramètres est laissée au choix du concepteur suivant son expérience.
- Le centre d'excellence en électronique et environnement KERP a développé l'outil PROTECT (Frad et Revnic 2007) qui a pour objectif d'évaluer la fin de vie du véhicule dès le processus de conception à partir de la méthode de calcul établie par la norme ISO 22628 (ISO 2002). L'évaluation repose sur la connaissance des procédés de recyclage, de compatibilité de la matière ainsi que des temps et séquences de désassemblage. L'évaluation du produit est basée sur des *scénarios de calcul* où le paramètre à optimiser est défini (coût, taux recyclage ou coût en respectant un seuil du taux de recyclage). L'outil fournit les taux de recyclage et de récupération de l'ensemble du produit ainsi que des informations additionnelles permettant d'analyser la performance de traitement en fin de vie du véhicule.
- Maudet-Charbuillet a développé l'outil d'aide à la décision pour l'émergence de filières de recyclage des matières plastiques (ODEFIRE) (Maudet-Charbuillet 2009) pour promouvoir l'émergence des filières de recyclage des matières plastiques. Elle présente à la fois un état des lieux des filières appuyant les choix des matériaux en conception, un outil d'aide à l'émergence des filières par l'analyse des capacités de chaque acteur à atteindre les conditions *idéales* d'évolution de la filière modélisée et un outil d'aide à l'intégration de l'utilisation de matière recyclée en conception.
- Le Pôle Éco-conception a créé un *fascicule de conception* qui a pour but l'intégration de la pensée fin de vie et l'économie circulaire en conception de produit (Pôle éco-conception 2015). Le document est organisé par étapes de traitement et propose des questions et des indicateurs associés à chacune des étapes.
- Dostatni *et al.* (Dostatni et al. 2016) ont développé une méthode d'aide à la décision basée sur des conseils et suggestions dans le but d'améliorer le produit vis-à-vis de son recyclage. Deux types de conseils

sont proposés : changer le type de matériau ou modifier les liaisons inséparables par des séparables. La suggestion est basée sur le conseil offert et sur les données recueillies par le système (historique des suggestions approuvées).

- Eco-systèmes® a développé l'outil REEECYC'LAB (Van Nieuwenhuyse, Assimon, et Bizouard 2016) qui a pour objectif d'aider les producteurs des produits électriques et électroniques à évaluer leur recyclabilité. Cette évaluation prend en compte la famille du produit évalué, les matériaux et leurs caractéristiques, les liaisons entre constituants et la facilité d'extraction des certains composants. Elle est enfin basée sur l'ensemble des données issues de la filière.
- De Aguiar *et al.* (de Aguiar et al. 2017) ont développé un outil d'aide à la décision en conception capable de fournir un diagnostic graphique du niveau de recyclabilité du produit (à partir de l'évaluation de la démontabilité du produit et de la recyclabilité des matériaux). Il permet au concepteur d'identifier facilement les composants critiques et de les modifier pour que le produit soit mieux recyclé lors qu'il sera en fin de vie.
- Rousseaux et al. (Rousseaux et al. 2017) ont développé Eco-tool-seeker, un guide (ou système d'informations) pour aider les entreprises à choisir des outils d'écoconception selon trois cibles : la production, la gestion ou la communication. Les outils sont classés comme normatifs ou non, génériques ou sectoriels, et comme de outils d'évaluation environnementale ou d'amélioration.

Il peut être noté à partir des approches abordées par ces outils que, du point de vue de la conception du produit, la création du lien entre concepteurs et acteurs de la filière de traitement en fin de vie fait face à deux problèmes sous-jacents : le premier porte sur l'évaluation de la valorisabilité du produit, et le deuxième sur la méthode d'aide à la décision en conception.

4. Synthèse

Dans ce chapitre, les actions mises en œuvre pour encourager la valorisation des produits en fin de vie (déchets) ont été étudiées. Elles se divisent en deux catégories principales. La première consiste à mettre en place des filières de traitement (voir § 3.1) ; la seconde vise à prévenir la génération des déchets lors de son traitement en fin de vie grâce à une meilleure conception du produit (voir § 3.2).

Concernant la première catégorie, l'état des lieux de la performance des filières REP (§ 3.1.2.3) a montré que les filières de traitement des produits en fin de vie ne sont pas toutes suffisamment adaptées aux produits qu'elles intègrent ; de même, les produits ne sont pas systématiquement conçus pour intégrer au mieux leur filière. Cette absence de synergie entre produit et filière est due à la faible communication entre concepteurs et acteurs de la filière, ainsi qu'au décalage temporel existant entre la conception-même du produit et sa fin de vie (en particulier pour les produits à longue durée de vie). À cela s'ajoute enfin la disparité spatiale des acteurs de la filière.

Le lien entre les acteurs de la conception et ceux de la fin de vie s'avère ainsi essentiel car il peut contribuer de façon importante à ce que le produit soit mieux valorisé lorsqu'il est assimilé à un déchet. Il a d'ailleurs été mis en évidence qu'une façon d'établir ce lien est l'évaluation de la valorisabilité du produit (§ 3.2.2.3). L'état des lieux de la corrélation entre valorisabilité et valorisation a montré l'existence d'un décalage entre la vision que les concepteurs ont du traitement de leur produit par la filière (performance théorique) et ce que traite réellement la filière (performance réelle). Cette différence découle principalement du peu d'informations dont dispose le concepteur lors de son analyse. En outre, l'écart existant entre le calcul effectué lors de la

conception et la performance réelle des acteurs de la filière de traitement laisse penser qu'une nouvelle méthode de calcul prenant en compte les données directement issues de la filière de traitement doit être mise en place.

Il a été évoqué au paragraphe 3.2.4 qu'une autre manière de renforcer ce lien consiste à développer des outils de conception intégrant la notion de fin de vie. À ce sujet, plusieurs outils ont été identifiés dans la littérature. Cependant, ils se révèlent insuffisamment utilisés en pratique, ce qui affaiblit de fait le lien entre conception et fin de vie ; il réside ainsi principalement aujourd'hui de l'évaluation de la valorisabilité du produit (§ 3.2.2). Le lien existant à ce jour est insuffisant, ce qui fait émerger la question de recherche suivante :

Comment créer un lien direct et bijectif entre le concepteur d'un produit et les acteurs de la filière en charge de son traitement en fin de vie ? Comment pérenniser cet échange d'informations entre acteurs ?

Il a enfin été constaté que du point de vue de la conception du produit, la création du lien entre concepteurs et acteurs de la filière de traitement en fin de vie révèle deux problèmes sous-jacents : l'évaluation de la valorisabilité du produit d'une part, et l'aide à la décision en conception d'autre part (§ 3.2.4). Ces deux problématiques seront abordées dans les paragraphes suivants.

4.1. Problématique liée à l'évaluation en conception de la valorisabilité d'un produit

L'évaluation de la valorisabilité d'un produit en conception doit donc nécessairement s'appuyer sur l'évaluation de la performance de traitement de la filière de fin de vie pour que les résultats soit représentatifs de la réalité.

Dans ce cadre, l'état de lieux de la performance des filières REP en France (voir tableau 4) montre que la performance des filières n'est évaluée qu'avec des critères techniques, plus précisément avec des taux massiques de performance. Ceci s'explique par le fait qu'aujourd'hui les objectifs réglementaires des filières REP sont généralement imposés en termes massiques de taux de collecte, taux de réutilisation et recyclage, et taux de valorisation (§ 3.1.2.2.1). Il faut cependant noter que l'objectif de la gestion des déchets n'est en fait pas de préserver la masse, mais de préserver la valeur fonctionnelle, matière ou énergétique du produit, tout en réduisant bien sûr ses impacts environnementaux (voir Chapitre 1, § 3.4.1). Les indicateurs utilisés à ce jour ne sont donc pas suffisants pour mesurer la performance d'une filière dans toutes ces dimensions ; certains aspects ne sont en effet pas pris en compte comme la qualité de la matière recyclée, la stabilité économique de la filière ou les impacts environnementaux associés aux traitements en fin de vie.

La notion de performance d'une filière de fin de vie doit alors être redéfinie. À partir des définitions de chaîne d'approvisionnement performante de Beamon et Leończuk (Beamon 1999b; Leończuk 2016), nous jugeons qu'une filière de traitement des produits en fin de vie est *performante* si elle est capable :

- de conserver le plus de valeur (fonctionnelle, matière ou énergétique) du produit ;
- de limiter l'utilisation des ressources, en générant le moindre impact sur l'environnement (déchets, émissions, ressources, etc.), sans risque pour la santé humaine ;
- tout en respectant les objectifs de coût, de qualité, de quantité et les délais de livraison demandés par ses clients.

Dans la même logique, si on analyse maintenant les indicateurs utilisés en conception pour évaluer la

performance du produit vis-à-vis de son aptitude à être valorisé en fin de vie par la filière (autrement dit sa valorisabilité), on s'aperçoit qu'ils ont les mêmes limites que ceux utilisés pour évaluer la performance des filières. En effet, le résultat des taux massiques est fortement influencé par la méthode de calcul utilisé, c'est-à-dire par le choix du périmètre d'analyse (voir § 3.1.2.2.1). Il est donc nécessaire de mieux définir la performance du produit vis-à-vis de son intégration par la filière de traitement en fin de vie.

À partir de la définition de valorisabilité proposée précédemment (§ 3.2.2.1), nous définissons que la conception d'un produit est performante en termes de valorisabilité, si la filière de traitement associée est capable de recouvrer les propriétés techniques et la valeur économique du produit complet, de ses composants et/ou de ses matériaux constitutifs, tout en restant pertinent sur les plans économique et environnemental. Les besoins d'analyse sont donc variés et ne peuvent se limiter à un seul domaine. Il est donc nécessaire de proposer :

- une *évaluation technique* pour mesurer d'une part les taux de valorisation (c.-à-d. la fraction massique valorisée par chacune des voies de valorisation), et d'autre part le degré de valorisation, c'est-à-dire le degré de préservation de la valeur technique (p. ex. la qualité de la matière fournie lors d'une valorisation matière) ;
- une *évaluation environnementale* pour estimer les impacts sur l'environnement et l'être humain, et vérifier ainsi la pertinence environnementale du traitement ;
- une *évaluation économique* pour déterminer la préservation de la valeur économique et juger ainsi la viabilité économique du traitement ;

tout en introduisant la souplesse nécessaire à la pris en compte des contraintes législatives actuelles ou à venir.

À ce jour, les méthodes de référence existant ne permettent pas de réaliser une telle évaluation. En effet, la performance d'intégration d'un produit par sa filière de traitement en fin de vie est évaluée en conception par deux paramètres seulement : la valorisabilité d'une part (critère technique), et les impacts environnementaux d'autre part (critère environnemental). Il n'y a pas de méthode de référence pour prendre en compte le critère économique. La question de recherche associée suivante peut donc être proposée :

Quels éléments prendre en compte en conception pour évaluer d'une part la valorisabilité du produit, et d'autre part la pertinence de la valorisation envisagée sur les plans économique et environnemental ?

4.2. Problématique liée à l'aide à la décision en conception

Lors d'une démarche d'écoconception, le concepteur doit interpréter les informations fournies par l'ensemble des indicateurs et trouver le meilleur compromis entre les exigences techniques, environnementales et économiques. La difficulté de l'analyse multicritère à laquelle le concepteur est confronté réside :

- d'une part, dans le fait que le champ d'étude de la performance est vaste et ses contours fluctuent selon les domaines d'analyse (p. ex. technique, économique et environnementale), voire même selon les définitions et périmètres d'analyse utilisés par chaque auteur (Horta Arduin et al. 2019). En effet, les indicateurs utilisés en conception sont fonctions de paramètres de natures différentes (p. ex. les indicateurs d'impacts environnementaux), même lorsqu'ils sont de natures comparables (p. ex. le taux de recyclage), leur interprétation peut varier ensuite d'une étude à l'autre. Enfin, les dénominations souvent dérivées d'anglicismes sont inadéquates et doivent souvent être redéfinies (p. ex. le terme *efficience*

remplace souvent à tort celui d'efficacité). Il faut donc redéfinir ce concept complexe de performance dans un cadre plus restreint et favoriser ainsi la compréhension des résultats fournis par les différents indicateurs ;

- d'autre part, dans le fait qu'il n'existe pas à ce jour d'outil d'aide à la décision en conception permettant de trouver le meilleur équilibre entre les différents domaines d'analyse. Dans le cas de l'analyse de cycle de vie par exemple, la pondération des émissions est possible, mais il n'existe pas une méthode de référence qui soit utilisée par tous les praticiens de l'ACV (Jolliet, Saadé, et Crettaz 2010)

La question de recherche associée à ces problématiques peut se formuler comme suit :

Comment communiquer efficacement au concepteur les résultats de cette évaluation pour faciliter et améliorer sa prise de décision ?

4.3. Représentation synoptique de la problématiques de recherche

Les éléments présentés dans ce chapitre ont mis en évidence l'absence de lien entre les concepteurs du produit et les acteurs de la filière en charge de son traitement en fin de vie. Il a également été souligné que la création d'un tel lien entre les acteurs conduit à deux questions de conception, l'évaluation de la valorisabilité du produit d'une part, et l'aide à la décision d'autre part. Un synopsis regroupant les trois questions de recherche est présenté à la figure 29.

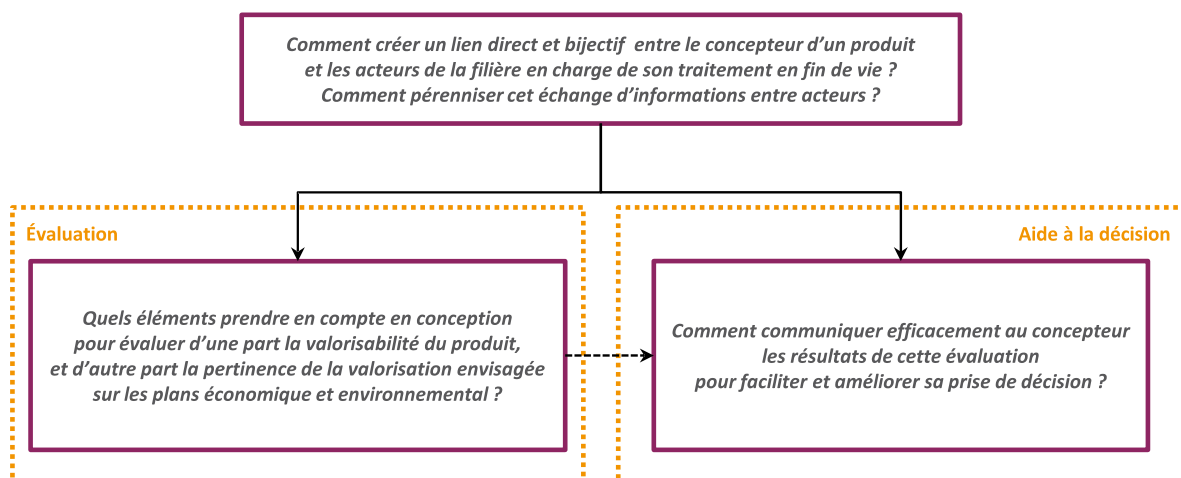


Figure 29. Questions de recherche

Chapitre 3

Hypothèses de solutions

Résumé Ce chapitre développe la problématique de recherche définie dans le précédent :

Comment créer un lien direct et bijectif entre le concepteur d'un produit et les acteurs de la filière en charge de son traitement en fin de vie ? Comment pérenniser cet échange d'informations entre acteurs ?

Les hypothèses permettant d'y répondre sont définies pour les deux questions de cette problématique.

La première est liée à l'évaluation en conception de la valorisabilité d'un produit. Elle est analysée à partir de l'identification de méthodes et d'indicateurs disponibles dans la littérature. Les méthodes sont comparées, et les indicateurs triés par type d'approche (c.-à-d. technique, environnemental ou économique) et classés en dix catégories (p. ex. préservation de la masse, préservation de la qualité, valeur environnemental de traitement en fin de vie, valeur économique de la matière, etc.).

La deuxième porte sur l'aide à la décision en conception. Elle est abordée par une analyse en deux étapes. D'abord, les besoins d'analyse associés à la démarche d'écoconception pour la fin de vie sont identifiés. Ce sont en particulier les leviers d'action (issus des lignes directrices de conception) mis à la disposition du concepteur pour améliorer son produit d'une part, et bien respecter les contraintes réglementaires d'autre part. Ensuite, l'adéquation entre les besoins d'analyse en conception précédemment identifiés et les indicateurs d'évaluation de la valorisabilité est analysée.

Cette analyse conduit en fin de chapitre à formuler deux hypothèses de résolution de la problématique de recherche :

- (i) Une évaluation de la valorisabilité du produit prenant en compte des critères techniques, économiques et environnementaux est nécessaire.
- (ii) Les résultats doivent être présentés sous la forme de lignes directrices de conception (telles que celles utilisées dans les démarches de conception pour X). L'outillage des lignes directrices de conception avec les indicateurs d'évaluation de la valorisabilité permettra de créer un lien entre les méthodes d'évaluation et d'aide à la décision en conception.

Table des matières du Chapitre 3

1. Introduction	137
2. Évaluer la valorisabilité du produit lors de sa conception.....	138
2.1. État de l’art des méthodes d’évaluation de la valorisabilité d’un produit	138
2.1.1. Méthodes mono-dimension	138
2.1.1.1. Approche technique.....	138
2.1.1.2. Approche économique.....	139
2.1.1.3. Approche environnementale	139
2.1.2. Méthodes multi-dimensions.....	139
2.1.2.1. Méthodes à deux dimensions	139
2.1.2.2. Méthodes intégrant les trois dimensions.....	141
2.2. Synthèse et analyse de méthodes d’évaluation de la valorisabilité d’un produit	142
2.2.1. Synthèse des méthodes d’évaluation de la valorisabilité d’un produit	143
2.2.2. Comparaison des méthodes d’évaluation de la valorisabilité du produit.....	145
2.2.2.1. 1 ^{er} critère. Nature et nombre d’approche(s) considérée(s) par la méthode	145
2.2.2.2. 2 ^e critère. Type de méthode et d’approche selon le nombre d’indicateurs	146
2.2.2.3. 3 ^e critère. Prise en compte des critères massiques	147
2.2.3. Comparaison des indicateurs d’évaluation de la valorisabilité du produit	147
2.2.3.1. 1 ^e critère. Prépondérance des indicateurs massiques.....	147
2.2.3.2. 2 ^e critère d’analyse. Type d’indicateur (nature des résultats).....	148
2.2.3.3. 3 ^e critère. Approche de l’indicateur	149
2.2.3.4. 4 ^e critère. Scénario de fin de vie considéré	149
2.2.3.5. 5 ^e critère. Phase du cycle de vie visée	150
2.2.3.6. 6 ^e critère. Utilisateur visé.....	151
2.2.4. Conclusions. Classement des indicateurs	151
3. Aide à la décision en conception pour une meilleure prise en compte de la fin de vie d’un produit.	152
3.1. Leviers d’action et contraintes réglementaires associés à une démarche d’écoconception pour la fin de vie	154
3.1.1. Identification des leviers d’action associés à une démarche de conception pour la fin de vie	155
3.1.1.1. Conception pour la valorisation fonctionnelle	155
3.1.1.2. Conception pour la valorisation matière	157
3.1.1.3. Conception pour la valorisation énergétique	161
3.1.1.4. Conception pour l’élimination.....	163
3.1.2. Identification des seuls leviers d’action environnementaux.....	164
3.1.3. Contraintes réglementaires	165
3.1.4. Synthèse de leviers d’action et contraintes réglementaires identifiés	166
3.2. Adéquation d’indicateurs de valorisabilité aux besoins d’analyse en conception	167
4. Hypothèses de solution.....	169

Chapitre 3

Hypothèses de solutions

1. Introduction

Dans sa feuille de route stratégique *Produits, procédés et services écoconçus* (ADEME 2011), l'ADEME identifie six des éléments principaux sur lesquels se base l'économie circulaire :

- l'utilisation modérée et la plus efficace possible des ressources non renouvelables ;
- l'exploitation des ressources renouvelables respectueuse de leurs conditions de renouvellement ;
- l'écoconception et la production propre ;
- la consommation respectueuse de l'environnement ;
- la valorisation des déchets en tant que ressources ;
- le traitement des déchets minimisant les nuisances.

Notre analyse se focalise sur le troisième point pour améliorer en conséquence les deux derniers.

L'ADEME précise en outre que les verrous à lever pour *développer l'écoconception* peuvent être de nature technique, méthodologique, économique, sociologique et politique. Ils sont de nature :

- technique, étant associés aux étapes du cycle de vie du produit ;
- méthodologique ;
- organisationnelle dans les entreprises et au sein de la chaîne de valeur ;
- économique ou comptable ;
- sociologique, culturelle et psychologique ;
- et liés aux politiques et mesures publiques.

La problématique de recherche de cette thèse s'inscrit dans le cadre des verrous méthodologiques et ce chapitre vise à les analyser. Cette étude s'effectue en deux temps :

- La première partie de l'analyse est centrée sur l'évaluation de la valorisabilité d'un produit. Un état de l'art des méthodes de calcul est d'abord dressé. Ensuite, une synthèse et un classement en sont proposés ;
- La deuxième partie de l'analyse porte sur l'aide à la décision en conception en vue de mieux prendre en compte la fin de vie d'un produit dès son cycle de développement. Les leviers d'action associées à une démarche d'écoconception sont d'abord identifiées (§ 3.1) et son adéquation aux indicateurs de valorisabilité est ensuite vérifiée (§ 3.1.4). L'objectif est de vérifier la possibilité d'associer des indicateurs aux leviers d'action pour pouvoir mesurer la performance du produit vis-à-vis de ces paramètres. Il s'agit

d'un outillage des lignes directrices permettant de simplifier et améliorer la prise de décision en conception.

2. Évaluer la valorisabilité du produit lors de sa conception

Cette partie aborde la première question de recherche : *quels éléments prendre en compte en conception pour évaluer d'une part la valorisabilité du produit, et d'autre part la pertinence de la valorisation envisagée sur les plans économique et environnemental ?*

2.1. État de l'art des méthodes d'évaluation de la valorisabilité d'un produit

Dans le chapitre précédent, la notion de valorisabilité a été introduite (voir Chapitre 2, § 3.2.2.1) et les méthodes d'évaluation de référence associées ont été présentées (Chapitre 2, § 3.2.2.2). Cette partie a pour objectif d'identifier d'abord les méthodes existant dans la littérature, et de présenter ensuite une synthèse et analyse.

2.1.1. Méthodes mono-dimension

Ce paragraphe présente les méthodes évaluant la valorisabilité par une seule des dimensions du produit, à savoir ses performances techniques, environnementales ou économiques.

2.1.1.1. Approche technique

Concernant l'approche technique, nous retenons bien évidemment les deux méthodes de référence de l'évaluation de la valorisabilité présentées dans le chapitre précédent (Chapitre 2, § 3.2.2.2).

Certaines études utilisent le même type d'évaluation, en s'appuyant également sur des rapports massiques. Elles appliquent une méthodologie de calcul très similaire à celle proposée par l'IEC/TR 62635 (IEC 2012), qui consiste à prendre en compte les performances de la filière de traitement en fin de vie dans le calcul des taux de recyclabilité et valorisabilité. Par exemple, Umeda *et al.* (Umeda et al. 2013) ont développé une méthode d'aide à la conception pour améliorer la recyclabilité des équipements électriques et électroniques. Ils se basent sur l'évaluation du taux de recyclabilité pour générer des alternatives de conception en réalisant une analyse d'impact associé aux changements de composition des matériaux et du scénario de fin de vie. Leur taux de recyclabilité est défini par le rapport massique de tous les composants recyclables sur l'ensemble du produit.

Alonso Movilla *et al.* (Alonso Movilla et al. 2013; Movilla 2016) abordent aussi l'évaluation du critère massique. Ils proposent de l'évaluer de trois façons différentes. Ils considèrent d'abord le taux de valorisation théorique : c'est l'indicateur le plus optimiste. Si un matériau est techniquement recyclable, il sera recyclé à 100 %. (L'indicateur est similaire à celui proposé par la norme ISO 22628 (ISO 2002).) Le second taux de valorisation est qualifié de *pratique* : il prend en compte l'existence d'installations de recyclage, ainsi que leurs performances. Cet indicateur est similaire à celui proposé par le rapport IEC/TR 62635 (IEC 2012). Enfin, le taux de valorisation dit *affecté* utilise le taux de valorisation pratique et le pondère par un indice de liaison (obtenu par l'agrégation d'indicateurs basés sur des critères d'assemblage et désassemblage) pour traduire l'importance relative des assemblages sur le traitement en fin de vie et la qualité du démontage.

Zeng et Li (Zeng et Li 2016) abordent l'approche technique d'un point de vue différent. Ils ont développé une

méthode pour mesurer la recyclabilité du produit en termes de qualité, de diversité et d'entropie²⁴ des matériaux constitutifs du produit. En outre, la difficulté de recyclage est évaluée pour répartir la responsabilité entre le producteur et le recycleur ; elle est calculée en fonction de la qualité des matériaux et de leur concentration dans le produit.

2.1.1.2. Approche économique

Chen *et al.* (Chen, Navin-Chandra, et Print 1994) travaillent sur une approche économique. Ils proposent un modèle basé sur l'analyse du coût et du bénéfice comme outil d'évaluation des aspects économiques de la conception pour recyclage. Le modèle est basé sur les coûts de traitement en fin de vie (c'est-à-dire démontage, broyage et tri, recyclage et élimination) et les revenus des produits issus du traitement en fin de vie (c.-à-d. les pièces réutilisables, les matériaux recyclés et les économies d'énergie). Deux indicateurs sont ainsi proposés. Le premier est le rapport bénéfice/coût (c'est un taux, autrement dit un indicateur adimensionnel). Le second est le bénéfice net du recyclage (il s'exprime en unité monétaire).

Villalba *et al.* (Villalba et al. 2002) évaluent la recyclabilité des matériaux du point de vue économique en considérant que la recyclabilité d'un matériau peut être estimée à partir de sa dépréciation (c.-à-d. sa perte de valeur économique). Deux indicateurs sont ainsi proposés : l'indice de recyclage est le rapport de la valeur des matières recyclées aux matières premières (indicateur adimensionnel), et la dépréciation est la perte de valeur des matières après utilisation (en unité monétaire).

2.1.1.3. Approche environnementale

Il n'existe aucune méthode d'évaluation de la valorisabilité uniquement basée l'approche environnementale.

2.1.2. Méthodes multi-dimensions

Ce paragraphe présente les méthodes évaluant la valorisabilité à partir d'une combinaison de critères techniques, environnementaux et/ou économiques.

2.1.2.1. Méthodes à deux dimensions

Chemineau (Chemineau 2011) propose une méthodologie d'écoconception qui mesure la valorisabilité des produits à l'aide d'un indicateur technique et d'un indicateur économique :

- le taux massique potentiel de valorisation est obtenu par la somme des taux de réutilisation, de recyclage et de valorisation énergétique du composant analysé (il correspond au taux de valorisabilité ; la seule différence est qu'ici les taux valorisabilité des voies de traitement sont calculés individuellement et additionnés à la fin) ;
- la rentabilité potentielle de valorisation est calculée en soustrayant le coût total du traitement de la valeur de tous les produits issus du traitement en fin de vie (c.-à-d. les pièces d'occasion, les matériaux recyclés et l'énergie récupérée).

Dostatni *et al.* (Dostatni et al. 2016) proposent d'évaluer la recyclabilité conjointement par un indicateur technique et un indicateur économique :

²⁴ En physique, l'entropie caractérise le degré de *désordre* (une entropie élevée correspondant à un désordre significatif). Les auteurs utilisent cette notion pour spécifier qu'un produit dont la composition est homogène (ce qui correspond à peu de désordre) assure une recyclabilité élevée. Il faut bien noter que cette approche de l'entropie s'éloigne de la définition originelle, mais permet une interprétation simple de leur cas d'étude.

- le *taux de recyclage total* est un indice calculé à partir de la somme de trois indicateurs : la diversité des matériaux, la diversité des fixations et l'objectif de recyclage ;
- le *coût de recyclage* représente le bénéfice du traitement en fin de vie. Il est calculé comme la différence du prix de vente de matériaux recyclables et réutilisables, et le coût total engagé pour le démontage, l'élimination des déchets dangereux et le transport jusqu'au site d'enfouissement des déchets.

Une méthode d'aide à la décision accompagne cette méthode d'évaluation.

Maris et Froelich (Maris et Froelich 2013) proposent de mesurer la recyclabilité par deux indicateurs techniques et un indicateur économique :

- la *préservation de la masse* est déterminée par le rapport massique des matériaux contenus dans le produit multipliés par un indicateur d'efficacité massique (taux de recyclage prenant en compte la performance des opérations de broyage, tri et raffinage) et du produit complet. L'indicateur d'efficacité est obtenu à partir de l'efficacité de traitement des matériaux (c.-à-d. broyage, tri et recyclage) ;
- la *préservation de l'exergie*²⁵ est déterminée par les masses des matériaux et un indicateur d'efficacité de l'exergie, construit comme le rapport entre l'exergie de la matière recyclée et celle de la matière vierge. Pour calculer l'exergie de la matière première secondaire, les pertes d'exergie due aux pertes de masse (lors du traitement), aux impuretés et à l'ajout de matière première pour la dilution sont pris en compte ;
- la *préservation de la valeur économique* est déterminée par la masse des matériaux et un indicateur d'efficacité économique, représentant la préservation de la valeur des matériaux après recyclage.

En outre, la méthode souligne l'importance de la définition du périmètre d'analyse. Il est notamment important de bien différencier les matériaux obtenus après broyage et tri (matières secondaires) et ceux obtenus après recyclage (matières *premières* secondaires). Le taux d'impuretés est alors pris en compte dans l'évaluation de la préservation de la masse.

De Aguiar *et al.* (de Aguiar et al. 2017) proposent de mesurer la recyclabilité d'un produit à partir de sa démontabilité et de la recyclabilité de ses matériaux.

- La *démontabilité du produit* est appréciée au travers de cinq indicateurs techniques : le nombre de fixations, le taux de fixations par pièce (nombre de fixations utilisées pour une pièce ramené au nombre total de fixations utilisés dans le produit), la nature des fixations et le nombre de fixations différentes, et l'accessibilité aux points de fixation ;
- La *recyclabilité des matériaux* est évaluée à l'aide de trois indicateurs techniques et un indicateur environnemental :
 - l'indicateur d'infrastructure s'intéresse à l'existence d'un centre de collecte et à sa distance depuis l'installation de traitement des déchets ;
 - l'indicateur de compatibilité des matériaux vis-à-vis de l'opération de recyclage ;
 - l'indicateur du groupe de matériaux évalue la nature toxicologique du matériau (c.-à-d. inerte, non inerte mais non dangereux, dangereux et à utilisation contrôlée) ;
 - et l'indicateur de contamination en fin de vie prend en compte les modifications chimiques des matériaux lors du processus de fabrication qui diminuent leur recyclabilité (p. ex. peinture, soudure, colle, etc.).

Il faut préciser que cette méthode ne propose pas d'indice permettant d'agréger ces indicateurs, ni pour la démontabilité, ni pour la recyclabilité des matériaux. Néanmoins, un outil accompagne la méthode pour fournir un diagnostic graphique du degré de recyclabilité du produit pour aider le concepteur dans sa prise de décision.

Ardente et Mathieux (Ardente et Mathieux 2014) proposent la méthode REAPro ; elle permet d'évaluer et

²⁵ L'exergie mesure la capacité d'un système à effectuer le maximum de travail (travail potentiel) lorsqu'il arrive à l'équilibre avec l'environnement (Szargut 2005). Cette mesure est utilisée pour analyser les flux d'énergie dans les procédés industriels afin d'améliorer la conception et minimiser la consommation totale d'énergie (*A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering: AtoZ* 2006).

d'améliorer l'efficacité des ressources (naturelles) des produits consommateurs d'énergie. À cet effet, quatre indicateurs techniques et cinq indicateurs environnementaux sont utilisés :

- les *taux de réutilisabilité, recyclabilité et valorisabilité* ; leur mode de calcul est conforme aux formules de l'IEC/TR 62635 (IEC 2012) (voir Chapitre 2, § 3.2.2.2) ;
- les *taux de bénéfice de réutilisabilité, recyclabilité et valorisabilité*, sont tous les rapports entre les valeurs environnementales (fonctions de l'impact ou du bénéfice environnemental) des activités de traitement (c.-à-d. réutilisation, recyclage ou récupération d'énergie) et les impacts environnementaux d'un seul cycle de vie du produit (production, fabrication, utilisation et élimination des matières premières) ;
- le *taux de contenu recyclé*. C'est le rapport massique entre la part des matériaux recyclés constituant le produit et le produit complet ;
- le *taux de bénéfice du contenu recyclé*. C'est le rapport entre la valeur environnementale de l'utilisation de matériaux recyclés et l'impact environnemental d'un unique cycle de vie du produit ;
- *l'utilisation de substances dangereuses*. Elle est évaluée qualitativement en quatre étapes : d'abord, une base de données de substances dangereuses est créée. Les composants du produit contenant l'une de ces substances sont ensuite listés. Les procédés de traitement en fin de vie sont alors identifiés pour chaque composant et ceux qui posent des problèmes sont enfin isolés.

Huisman *et al.* (Huisman, Boks, et Stevels 2003; Huisman 2003) proposent la méthode QWERTY/EE qui vise à définir l'éco-efficacité d'un produit à partir d'une évaluation environnementale et économique :

- L'approche QWERTY (acronyme de l'anglais *quotes for environmentally weighted recyclability*) est une alternative à l'évaluation traditionnelle de l'efficacité du recyclage des matériaux par le seul critère massique. L'objectif est d'établir un lien entre la valeur environnementale réelle (c'est-à-dire l'impact environnemental positif ou négatif) du traitement en fin de vie, et les meilleurs et pire scénarios. Le meilleur scénario de fin de vie (valeur environnementale minimale) correspond à la valorisation de tous les matériaux sans aucun impact ; le pire (valeur environnementale maximale) correspond au scénario où chaque matériau finit dans la pire voie de valorisation possible (réaliste). Le score QWERTY est la différence des impacts environnementaux réel et maximum sur une échelle normalisée (c.-à-d. de 0 à 100 %). Une mesure complémentaire est le score QWERTYloss, qui indique la différence d'impacts environnementaux réel et minimal. La qualité des matériaux est prise en compte dans l'indicateur d'évaluation de l'impact environnemental du recyclage ;
- De même que pour le QWERTY, l'approche d'efficacité économique (EE) cherche à établir un lien entre la valeur économique réelle du traitement en fin de vie d'une part, et le meilleur et le pire scénario d'autre part. Le meilleur scénario de fin de vie consiste à ce que tous les matériaux soient récupérés sans aucune perte de masse et sans aucun coût économique de traitement²⁶ ; le pire correspond aux coûts les plus élevés par processus pour chaque matériau considéré.

Pour faire le lien entre ces deux évaluations, Huisman *et al.* utilisent une représentation graphique plane où les ordonnées représentent les coûts et les gains économiques, et les abscisses les impacts et les bénéfices environnementaux.

2.1.2.2. Méthodes intégrant les trois dimensions

Mathieux *et al.* (Mathieux, Froelich, et Moszkowicz 2008) proposent la méthode ReSICLED. Ils modélisent les filières de traitement en fin de vie et réalisent une évaluation multicritère de la valorisabilité du produit pour promouvoir une conception conscientisée de la fin de vie. ReSICLED propose un ensemble d'indicateurs techniques, économiques et environnementaux :

²⁶ Les auteurs reconnaissent qu'il s'agit d'un scénario théorique optimal, mais irréalisable (Huisman, Boks, et Stevels 2003).

- les *indicateurs de valorisation massive (recyclage et valorisation)* sont tous les deux calculés en soustrayant les masses des fractions sortantes de la filière qui ne concernent pas la voie de valorisation souhaitée du produit complet, puis divisés par la masse totale du produit. Ces indicateurs correspondent respectivement au taux de réutilisabilité et recyclabilité et au taux de valorisabilité ;
- l'*indicateur de valorisabilité économique* est le bénéfice calculé en soustrayant le gain associé à la vente des produits issus de la filière de traitement (p. ex. matériaux recyclés et énergie) du coût de tous les procédés de traitement en fin de vie ;
- l'*indicateur d'impact environnemental de la valorisabilité* est obtenu par le rapport de la valeur environnementale (différence entre le bénéfice environnemental de l'utilisation de matériaux recyclés et de l'énergie récupérée, et l'impact environnemental des procédés de traitement en fin de vie) et de l'impact environnemental associé à la fabrication du produit.

Ardente *et al.* proposent ENDLESS (Ardente, Beccali, et Cellura 2003). C'est une méthode de prise de décision multi-attributs visant à aider le concepteur à choisir le produit ayant le meilleur potentiel de recyclabilité. Cette méthode utilise un indice global de recyclage pour évaluer le potentiel de recyclabilité des produits. Il est obtenu en pondérant et en fusionnant trois indicateurs : énergie et environnement, économique et technologique (aucun n'est détaillé par les auteurs). Les preneurs de décision doivent choisir toutes les alternatives de structures de produit appropriées, les paramètres d'évaluation, et calibrer enfin le modèle (c.-à-d. estimer la pondération à appliquer aux trois indicateurs) pour qu'il puisse répondre à leurs besoins spécifiques.

2.2. Synthèse et analyse de méthodes d'évaluation de la valorisabilité d'un produit

Quinze méthodes, 38 indicateurs et un indice (construit à partir d'une agrégation d'indicateurs) d'évaluation de la valorisabilité en fin de vie d'un produit ont été recensés dans la littérature. Un bilan en est dressé dans le tableau 8 (§ 2.2.1) où ils sont comparés sur plusieurs critères.

L'analyse est faite en deux temps. D'abord, les méthodes sont comparées pour identifier les différences principales (p. ex. l'approche abordée ou le nombre de critères utilisés). Dans un deuxième temps, les indicateurs utilisés dans les méthodes recensées sont étudiés pour vérifier si des tendances d'analyse existent. Enfin, les indicateurs sont triés par approche et classés par catégories pour mieux identifier les indicateurs et les indices utilisés à ce jour pour évaluer la valorisabilité d'un produit.

2.2.1. Synthèse des méthodes d'évaluation de la valorisabilité d'un produit

Méthode	Auteur	Année	Indicateur	Scénario de fin de vie											Référence													
				Type	Approche			Phase d'usage			Utilisateur visé																	
				Quantitatif	Semi-quantitatif	Qualitatif	Technique	Environnementale	Économique	Autre	Technologies reconnues	Réaliste défini par l'utilisateur + BdD ²⁷	Réaliste défini par un outil + BdD	Sans prise en compte de la fin de vie	Conception	Après conception	Non spécifique	Concepteur	Expert écoconception / Expert fin de vie	Fabricant (non spécifique)	Acteurs de la filière de traitement	Gouv. (décideur politique, agence env.)	Autre	Non spécifique				
-	Chen, Navin-Chandra et Prinz	1993	Rapport coût bénéfice du recyclage	•					•			•			•			•								(Chen, Navin-Chandra, et Print 1994)		
			Bénéfice net du recyclage	•						•			•			•			•									
ISO 22628	Organisation internationale de normalisation (ISO)	2002	Taux de recyclabilité	•		•					•				•					•						(ISO 2002)		
			Taux de valorisabilité	•		•						•				•					•							
-	Villalba, Segarra, Fernández, Chimenos et Espiell	2002	Indice de recyclage	•						•		•					•							•		(Villalba et al. 2002)		
			Dévaluation	•							•		•					•							•			
ENDLESS	Ardente, Beccali et Cellura	2003	Indice global de recyclage		•		•	•	•			•			•				•							(Ardente, Beccali, et Cellura 2003)		
QWERTY/EE	Huisman, Boks et Stevels	2003	QWERTY	•							•				•	•			•			•	•			(Huisman, Boks, et Stevels 2003;		
			Efficacité économique	•							•		•			•	•			•			•	•		Huisman 2003)		
ReSICLED	Mathieux, Froelich et Moszkowicz	2008	Valorisation massive (recyclage)	•		•						•			•				•	•						(Mathieux, Froelich, et Moszkowicz 2008)		
			Valorisation massive (valorisation)	•			•						•			•				•	•							
			Valorisabilité économique	•							•			•			•				•	•						
			Impact environnemental de la valorisabilité	•							•			•			•				•	•						

²⁷ BdD : base de données

Chapitre 3
Hypothèses de solutions

-	Chemineau	2011	Taux massique potentiel de valorisation	•	•	•	•	•	(Chemineau 2011)
			Rentabilité potentielle de valorisation	•	•	•	•	•	
IEC/TR 62635	Commission électrotechnique internationale (IEC)	2012	Taux de recyclabilité	•	•	•	•	•	(IEC 2012)
			Taux de valorisabilité	•	•	•	•	•	
-	Alonso Movilla, Zwolinski, Barnabé, Dalla Zuanna et Moulin	2013	Taux de valorisation théorique	•	•	•	•	•	(Alonso Movilla et al. 2013; Movilla 2016)
			Taux de valorisation pratique	•	•	•	•	•	
			Taux de valorisation affecté	•	•	•	•	•	
-	Maris et Froelich	2013	Préservation de la masse	•	•	•	•	•	(Maris et Froelich 2013)
			Préservation de l'exergie	•	•	•	•	•	
			Préservation de la valeur économique	•	•	•	•	•	
-	Umeda, Fukushige, Mizuno et Matsuyama	2013	Taux de recyclabilité	•	•	•	•	•	(Umeda et al. 2013)
REAPro	Ardente et Mathieux	2014	Taux de réutilisabilité	•	•	•	•	•	(Ardente et Mathieux 2014)
			Taux de recyclabilité	•	•	•	•	•	
			Taux de valorisabilité	•	•	•	•	•	
			Taux de bénéfice de réutilisabilité	•	•	•	•	•	
			Taux de bénéfice de recyclabilité	•	•	•	•	•	
			Taux de bénéfice de valorisabilité	•	•	•	•	•	
			Taux de contenu recyclé	•	•	•	•	•	
			Taux de bénéfice de contenu recyclé	•	•	•	•	•	
			Utilisation de substances dangereuses	•	•	•	•	•	
-	Dostatni, Diakun, Grajewski, Wichniarek et Karwasz	2016	Taux de recyclage total	•	•	•	•	•	(Dostatni et al. 2016)
			Coût de recyclage	•	•	•	•	•	
-	Zeng et Li	2016	Recyclabilité	•	•	•	•	•	(Zeng et Li 2016)
			Difficulté de recyclage	•	•	•	•	•	
-	De Aguiar, De Oliveira, Da Silva, Bond, Kovacs Scalice et Becker	2017	Démontabilité du produit	•	•	•	•	•	(de Aguiar et al. 2017)
			Recyclabilité des matériaux	•	•	•	•	•	

Tableau 8. Comparaison des méthodes d'évaluation de la valorisabilité d'un produit (Leal et al. 2018)

2.2.2. Comparaison des méthodes d'évaluation de la valorisabilité du produit.

Dans ce paragraphe, les méthodes d'évaluation de la valorisabilité du produit identifiées dans la littérature sont comparées afin d'identifier les tendances d'analyse. Trois critères ont été utilisés : (i) la nature et le nombre d'approches considérées par la méthode, (ii) le type de méthode et d'approche selon le nombre d'indicateurs et (iii) la prise en compte des critères massiques.

2.2.2.1. 1^{er} critère.

Nature et nombre d'approche(s) considérée(s) par la méthode

Toutes les méthodes identifiées visent à évaluer la valorisabilité d'un produit, sans être pour autant construites de la même manière. En effet, certaines évaluent les aspects techniques où d'autres se focalisent sur des critères plus environnementaux ou économiques. La nature de l'approche exprime l'objectif de l'évaluation portée par la méthode.

Les méthodes peuvent ainsi être mono ou multi-approches. C'est pourquoi le premier critère de comparaison est la nature et le nombre d'approches utilisés. Le bilan de cette analyse est présenté dans le tableau 9.

Nombre d'approches	Nature de l'approche	Nombre de méthodes identifiées dans la littérature	Total
1 approche	Technique	5	7
	Économique	2	
	Environnementale	0	
2 approches	Technique et économique	3	6
	Technique et environnementale	2	
	Économique et environnementale	1	
3 approches	Technique, économique et environnementale	2	2

Tableau 9. Analyse des méthodes d'évaluation de la valorisabilité. Nature et nombre d'approches utilisées par méthode

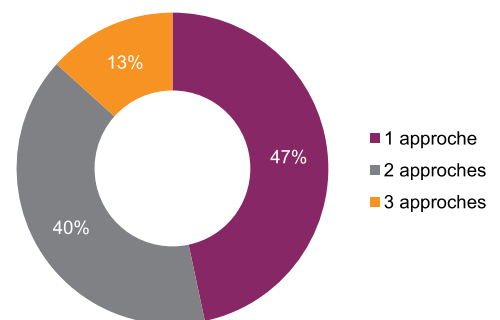


Figure 30. Analyse des méthodes d'évaluation de la valorisabilité. Nombre d'approches utilisées par méthode

L'analyse montre que seules des approches abordant les aspects techniques, environnementaux ou économiques (ou bien une combinaison de deux ou trois) sont utilisées. En effet, il n'y a pas eu d'autre type d'approche utilisé parmi les méthodes identifiées.

Sur l'ensemble des méthodes identifiées, il ressort que presque la moitié n'utilise qu'une seule approche d'évaluation (47 % ; voir figure 30). L'approche technique est la plus utilisée (pour un tiers du total), suivie de l'économique (13 %). On rappelle qu'aucune approche uniquement environnementale n'a été développée. Cela s'explique par le fait que la dimension environnementale est souvent analysée à part, en particulier lors de l'analyse de l'impact du cycle de vie du produit.

Les méthodes d'analyse multi-approches représentent donc 53 % de l'ensemble ; les méthodes à deux et trois approches en représentent respectivement 40 et 13 % (voir figure 30).

2.2.2.2. 2^e critère.

Type de méthode et d'approche selon le nombre d'indicateurs

Un autre classement peut être proposé selon le nombre de critères utilisés (c.-à-d. selon les approches mono ou multicritère). L'analyse a été menée en comptabilisant le nombre d'indicateurs retenus par chaque méthode. Les résultats sont présentés dans le tableau 10.

Type de méthode	Nombre d'indicateurs	Nombre de méthodes	Total
Monocritère	1 indicateur	2	2
Multicritère	2 indicateurs	9	13
	3 indicateurs	2	
	4 indicateurs et plus	2	

Tableau 10. Analyse des méthodes d'évaluation de la valorisabilité.
Type de méthode selon le nombre de critères utilisés

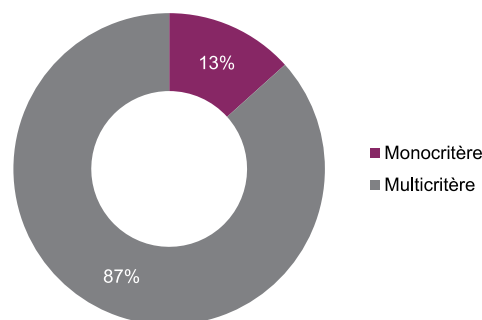


Figure 31. Analyse des méthodes d'évaluation de la valorisabilité. Type de méthode selon le nombre d'indicateurs utilisés

L'étude met en évidence que la majorité des méthodes (87 % ; voir figure 31) utilisent une évaluation multicritère. Ce n'est pas surprenant puisque les méthodes multi-dimensions (et donc par essence multicritères) représentent à elles seules 53 % de l'ensemble (voir figure 30). Il peut être aussi noté dans le tableau 10 que plus de la moitié des méthodes (soit 9 sur 15) utilisent deux indicateurs dans leur analyse.

Une analyse complémentaire consiste à dénombrer les indicateurs utilisés dans chaque approche, pour identifier son caractère mono ou multicritère (voir tableau 11 et figure 32).

Type d'approche	Nombre d'indicateurs	Nombre de méthodes	Total
Monocritère	1	11	11
Multicritère	2	8	11
	3	1	
	4 et plus	2	

Tableau 11. Analyse des méthodes d'évaluation de la valorisabilité.
Type d'approche selon le nombre d'indicateurs utilisés

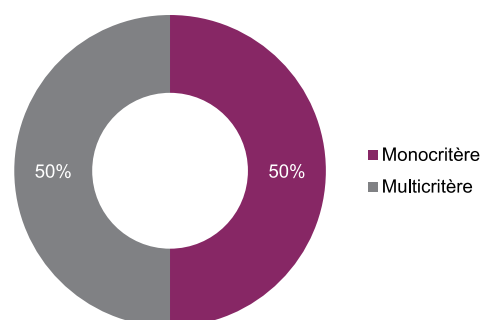


Figure 32. Analyse des méthodes d'évaluation de la valorisabilité. Type d'approche selon le nombre d'indicateurs utilisés

La figure met en évidence que même s'il semble y avoir une volonté de développer des approches multicritères, la moitié n'en utilisent qu'un seul. De plus, en ce qui concerne l'autre moitié, il a été observé que très peu de méthodes (soit 13,6 %) utilisent plus de deux critères.

Les trois études précédentes montrent la complexité associée à l'évaluation de la valorisabilité d'un produit.

En effet, elle doit être non seulement abordée du point de vue technique, mais aussi économique et environnemental. De plus, la prise en compte d'un seul indicateur pour chaque approche ne suffit pas. Cette réflexion est en accord la tendance au développement de méthodes d'évaluation multi-approche et multicritère, constatée dans la littérature.

2.2.2.3. 3^e critère.

Prise en compte des critères massiques

Il a été mis en évidence que l'analyse de la préservation de la masse joue un rôle primordial car il constitue à ce jour le critère le plus répandu (à partir du calcul des taux de recyclabilité et valorisabilité utilisés par les méthodes de référence ; voir Chapitre 2, § 3.2.2.2). C'est pourquoi nous choisissons enfin d'analyser les méthodes identifiées pour connaître la proportion de celles se basant essentiellement sur la préservation de la masse. Le tableau 12 et la figure 33 présentent les résultats de cette analyse.

La figure montre que plus de la moitié des méthodes (soit 60 %) prennent en compte la préservation de la masse dans leur analyse.

Prise en compte des critères massiques	Nombre de méthodes
Méthodes prenant en compte la préservation de la masse	9
Méthodes ne prenant pas en compte la préservation de la masse	6

Tableau 12. Analyse des méthodes d'évaluation de la valorisabilité.
Méthodes évaluant la préservation de la masse

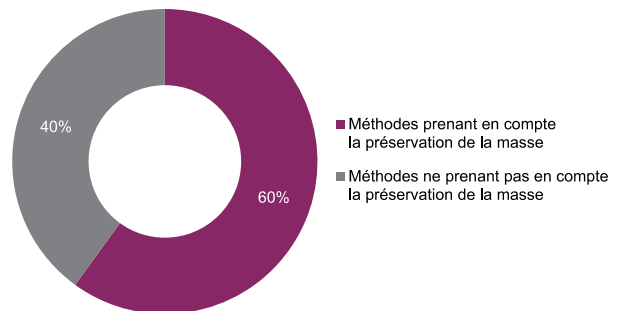


Figure 33. Analyse des méthodes d'évaluation de la valorisabilité.
Méthodes évaluant la préservation de la masse

2.2.3. Comparaison des indicateurs d'évaluation de la valorisabilité du produit

Dans le paragraphe précédent, les méthodes d'évaluation de la valorisabilité identifiées dans la littérature ont été comparées et les tendances d'analyse ont été identifiées.

Dans ce paragraphe, une analyse similaire est effectuée mais cette fois-ci sur les indicateurs utilisés dans ces méthodes. Six critères de comparaison ont été utilisés (i) la prépondérance des indicateurs massiques, (ii) le type d'indicateur (nature des résultats), (iii) l'approche de l'indicateur, (iv) le scénario de fin de vie considéré, (v) la phase du cycle de vie visée et (vi) l'utilisateur visé.

2.2.3.1. 1^e critère.

Prépondérance des indicateurs massiques

Le nombre d'indicateurs de préservation de la masse a été choisi comme le premier critère de comparaison pour identifier quelle part les indicateurs massiques représente sur l'ensemble des indicateurs identifiés. On souhaite ainsi confirmer leur prépondérance. Le résultat de cette analyse est présenté dans le tableau 13 et à la figure 34.

Prépondérance des indicateurs massiques	Nombre d'indicateurs
Indicateurs de préservation de la masse	15
Autres types d'indicateur	24

Tableau 13. Analyse des indicateurs de valorisabilité.
Nombre d'indicateurs de préservation de la masse

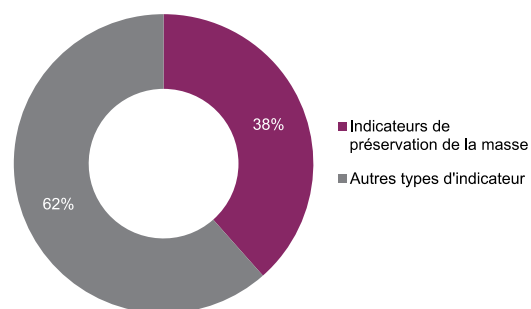


Figure 34. Analyse des indicateurs de valorisabilité.
Nombre d'indicateurs de préservation de la masse

Les indicateurs de préservation de la masse représentent bien une grande partie de l'ensemble (soit 38 % ; voir figure 34).

2.2.3.2. 2^e critère d'analyse.

Type d'indicateur (nature des résultats)

La caractéristique essentielle de tout indicateur est le type de résultat qu'il peut fournir. Ainsi, on les distingue selon qu'ils sont quantitatifs, semi-quantitatifs ou qualitatifs. Les indicateurs quantitatifs sont ceux dont la valeur est mesurable ou quantifiable. Les qualitatifs expriment quant à eux la qualité ou la nature d'une grandeur et sont très souvent définis à partir d'une appréciation personnelle. Enfin, les indicateurs semi-quantitatifs fournissent des résultats quantifiés, mais la façon dont ils sont calculés repose dans une certaine mesure sur des choix et des appréciations de l'acteur en charge du calcul.

Ce deuxième critère d'analyse repose sur le fait que les indicateurs quantitatifs (donc mesurables) sont par définition plus précis et fiables, et donc préférables aux autres types d'indicateurs. L'analyse du deuxième critère est présentée dans le tableau 14 et à la figure 35.

Type d'indicateur	Nombre d'indicateurs
Quantitatif	35
Semi-quantitatif	3
Qualitatif	1

Tableau 14. Analyse des indicateurs de valorisabilité.
Type d'indicateur

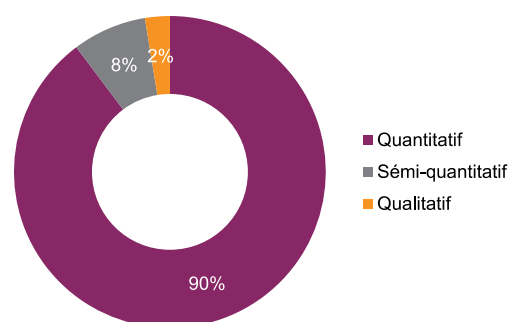


Figure 35. Analyse des indicateurs de valorisabilité.
Type d'indicateur

On constate ainsi que la quasi-majorité des indicateurs identifiés sont quantitatifs (90 %), suivi par les indicateurs semi-quantitatifs (8 %) et enfin par les indicateurs qualitatifs (2 % ; voir figure 35). Une prédominance des indicateurs fournissant des résultats quantitatifs est donc notée.

2.2.3.3. 3^e critère.

Approche de l'indicateur

De même, il est intéressant d'identifier la dimension évaluée par les indicateurs (c.-à-d. vérifier s'il s'agit d'un indicateur technique, environnemental ou économique). L'approche d'évaluation a donc été choisie comme troisième critère d'analyse. Les résultats sont présentés dans le tableau 15 et à la figure 36.

La figure montre que la quasi-totalité des indicateurs (soit 95 %) n'utilisent qu'un seul critère d'évaluation. Parmi ces indicateurs mono-approche, l'approche technique est de loin la plus utilisée (54 %), suivie par l'approche économique (23 %) et enfin par l'approche environnementale (18 %).

Il peut être constaté dans le tableau que seuls deux indicateurs (soit 5 %) proposent une évaluation multi-approche.

Approche de l'indicateur	Nombre d'indicateurs
Technique	21
Économique	9
Environnementale	7
Multi-approche	2

Tableau 15. Analyse des indicateurs de valorisabilité
Approche de l'indicateur

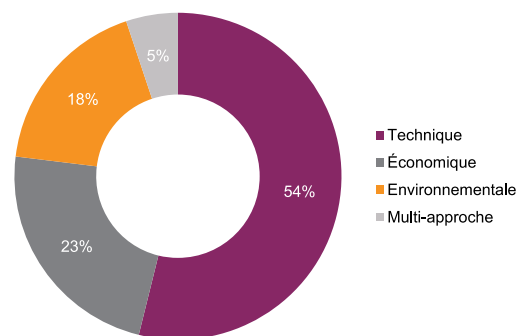


Figure 36. Analyse des indicateurs de valorisabilité.
Approche de l'indicateur

2.2.3.4. 4^e critère.

Scénario de fin de vie considéré

Tous les indicateurs identifiés servent à évaluer la valorisabilité en fin de vie d'un produit. Il est donc nécessaire de vérifier comment la fin de vie est prise en compte par les différentes méthodes. C'est habituellement fait à partir de la définition d'un scénario de fin de vie (voir Chapitre 1, § 4.1). Ce choix est important car il a une influence directe sur les résultats obtenus et donc sur la validité et la robustesse de l'analyse. C'est pourquoi le scénario de fin de vie considéré a été choisi comme le quatrième critère d'analyse.

L'étude a été menée en analysant si les indicateurs étaient évalués avec

- (i) des scénarios de fin de vie qui prennent en compte toutes les technologies de traitement existantes, y compris celles qui ont été testés avec succès à l'échelle de laboratoire mais qui ne sont pas disponibles à l'échelle industrielle ;
 - (ii) des scénarios de fin de vie réalistes²⁸ définis par l'utilisateur et dont les informations de la filière sont obtenues à l'aide d'une base de données ;
 - (iii) des scénarios de fin de vie réalistes définis par un outil numérique et dont les informations de la filière sont obtenues à l'aide d'une base de données ;
- et (iv) sans prise en compte de la fin de vie.

Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau 16 et à la figure 37.

²⁸ On considère qu'un scénario de fin de vie est *réaliste* dès lorsqu'il s'appuie sur une filière existante ou qu'il prend uniquement en compte les technologies de traitement disponibles sur le terrain.

On constate que la majorité des indicateurs (soit 90 %) prennent en compte la fin de vie. Pour la plupart, la responsabilité de la définition du scénario de fin de vie repose d'ailleurs sur l'utilisateur de la méthode. De plus, la prise en compte de la fin de vie est souvent associée à l'utilisation d'une base de données. L'ensemble des proportions est indiqué à la figure 37.

Scénario de fin de vie	Nombre d'indicateurs
Technologies reconnues	3
Réaliste (utilisateur + BdD)	30
Réaliste (outil + BdD)	2
Sans prise en compte de la fin de vie	4

Tableau 16. Analyse des indicateurs de valorisabilité.
Scénario de fin de vie

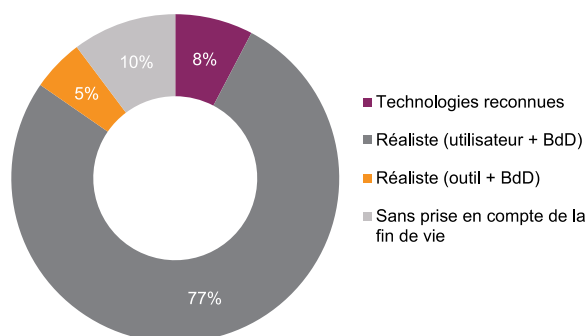


Figure 37. Analyse des indicateurs de valorisabilité.
Scénario de fin de vie

2.2.3.5. 5^e critère.

Phase du cycle de vie visée

Tout indicateur cherche à répondre au besoin spécifique de l'analyse d'un acteur donné. Comme les informations disponibles ne sont pas les mêmes d'une phase du cycle de vie à une autre, il est important de savoir pour qui a été créée la méthode et à quel moment elle peut ou doit être utilisée.

La valorisabilité d'un produit est principalement évaluée lors de phase de conception. Cependant, les informations en résultant peuvent aussi être utiles à d'autres acteurs autres que les concepteurs, et lors d'autres étapes du cycle de vie. C'est pourquoi le cinquième critère est l'identification de la phase d'usage visée par l'indicateur. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau 17.

Phase du cycle de vie visée	Nombre d'indicateurs
Conception	22
Après conception	11
Les deux	4
Non spécifié	2

Tableau 17. Analyse des indicateurs de valorisabilité.
Phase du cycle de vie visée

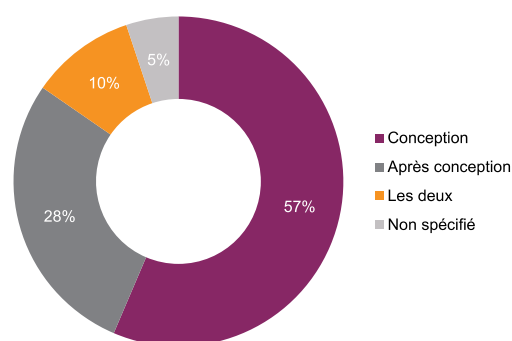


Figure 38. Analyse des indicateurs de valorisabilité.
Phase du cycle de vie visée

La figure 38 montre que la plupart d'indicateurs (soit 57 %) visent à être utilisés uniquement lors de la phase de conception. Il peut aussi être noté qu'un grand nombre sont destinés à être utilisés après (28 %). Quelques indicateurs (10 %) peuvent être utilisés aussi bien lors de la conception du produit qu'après.

2.2.3.6. 6^e critère.

Utilisateur visé

On s'intéresse ici à identifier l'acteur à qui la méthode se destine. Il est en effet important de savoir qui l'utilise car les acteurs diffèrent d'une étape à l'autre, et ils n'ont ni les mêmes besoins, ni le même accès aux informations.

Les acteurs de la conception à qui s'adressent les indicateurs sont principalement le concepteur et l'expert en écoconception et/ou en fin de vie. En ce qui concerne les phases de vie et fin de vie du produit, il a été identifié que les indicateurs s'adressent aux acteurs de la filière de traitement et au gouvernement (décideurs politiques, agences environnementales, etc.). L'analyse de ce critère est présentée dans le tableau 18.

Utilisateur visé	Groupe d'acteurs	Nombre d'indicateurs
Concepteur	-	16
Expert en écoconception ou en fin de vie	-	2
Fabricant (non spécifié)	-	4
Acteurs de la filière de traitement	-	0
Gouv. (décideur politique, agence env.)	-	9
Autre	-	0
Multi-acteurs	Équipe conception	4
	Tous	2
Non spécifié	-	2

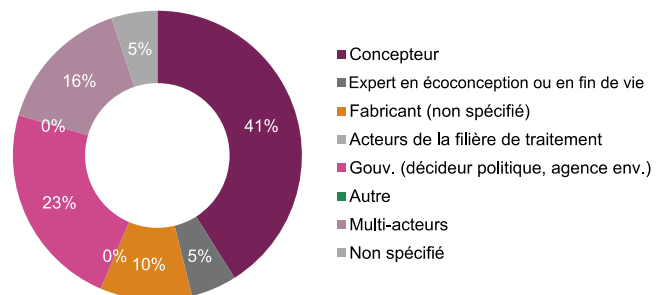


Tableau 18. Analyse des indicateurs de valorisabilité.
Utilisateur visé

Figure 39. Analyse des indicateurs de valorisabilité.
Utilisateur visé

La figure 39 montre en outre que la plupart des indicateurs sont destinés à un seul type d'acteur. Parmi ces indicateurs, la majorité (soit 56 %) sont destinés à l'usage du fabricant, qu'il s'agisse du concepteur (41 %) ou de l'expert en écoconception/fin de vie du produit (5 %). Il y a aussi une grande quantité d'indicateurs (23 %) destinés au gouvernement (décideurs politiques, agences environnementales, etc.).

Quelques uns (soit 16 %), destinés à plusieurs groupes acteurs, ont été aussi identifiés. Ces indicateurs ont été classés en deux groupes : le premier concerne ceux s'adressant à l'équipe de conception (c.-à-d. les concepteurs et les experts en écoconception ou fin de vie), et le deuxième regroupe ceux à destination de toutes les parties prenantes (c.-à-d. les concepteurs, les acteurs de la filière et le gouvernement). Pour une faible part des indicateurs enfin (soit 10 %), l'utilisateur visé n'a pas été spécifié.

2.2.4. Conclusions.

Classement des indicateurs

Tel qu'indiqué précédemment, 38 indicateurs et un indice d'évaluation de la valorisabilité d'un produit ont été identifiés. Les indicateurs²⁹ ont d'abord été triés par type d'approche (c.-à-d. technique, environnemental

²⁹ Dans ce classement, l'indice proposé par Ardente *et al.* (Ardente, Beccali, et Cellura 2003) n'a pas été pris en compte car il ne peut pas être classé selon une unique approche vu qu'il est construit à partir de l'agrégation d'un indicateur technique, un environnemental et un économique.

ou économique) et classés en dix catégories. En outre, les indicateurs similaires (voire identiques) ont été regroupés sous un même nom. Le classement est détaillé dans le tableau 19.

Pour ce qui est de l'approche technique, cinq catégories ont été définies. Les deux premières font référence à la manière dont le produit est intégré par la filière, et les trois autres sont plus orientées sur l'évaluation de la structure et composition du produit.

- la *préservation de la masse* regroupe les taux de réutilisabilité, de recyclabilité et valorisabilité. Ces indicateurs évaluent la capacité des procédés de traitement en fin de vie à trier et récupérer les différents matériaux constituant le produit (par rapport à la quantité de matière du produit avant traitement) ;
- la *préservation de la qualité* a été définie pour compléter celle de la préservation de la masse. Il est en effet aussi question de préserver la qualité de la matière récupérée ;
- la *recyclabilité*. Les indicateurs permettant d'évaluer diverses problématiques toutes liées à l'aptitude à recycler le produit ont été regroupés : recyclabilité du produit et des matériaux et la difficulté de recyclage ;
- la *démontabilité* du produit ;
- et la *quantité de matière recyclée* contenue dans le produit.

L'approche environnementale est évaluée selon trois critères :

- la *toxicité des substances utilisées* qui permet d'identifier si des substances nocives sont utilisées dans le produit (dans le but de les remplacer par d'autres non dangereuses, ou si leur utilisation est autorisée en une certaine quantité, s'assurer qu'elle ne dépasse pas la limite autorisée) ;
- la *valeur environnementale du traitement en fin de vie* qui porte sur l'évaluation environnementale du traitement du produit en fin de vie. (L'expression *valeur environnementale* est utilisée ici car des indicateurs évaluent non seulement les impacts environnementaux du traitement en fin de vie, mais aussi définissent si le traitement génère un impact ou un bénéfice environnemental.) ;
- et la *valeur environnementale du contenu recyclé* qui détermine l'impact ou le bénéfice environnemental de l'utilisation de la matière recyclée.

Les indicateurs économiques s'intéressent à l'évaluation de

- la *valeur économique du traitement en fin de vie* (c.-à-d. si le traitement du produit génère un coût ou un gain économique) ;
- et la *valeur économique de la matière* (c.-à-d. la dévaluation ou préservation de la valeur de la matière et sa relation avec la valeur de la matière vierge).

3. Aide à la décision en conception pour une meilleure prise en compte de la fin de vie d'un produit.

Cette partie aborde la deuxième problématique de recherche : *comment communiquer efficacement au concepteur les résultats de cette évaluation pour faciliter et améliorer sa prise de décision ?*

Lors d'une démarche de conception, le concepteur doit systématiquement faire des compromis dans ses choix pour trouver la solution qui répond le mieux à sa problématique ou à son cahier des charges. Pour simplifier cette démarche et assurer une meilleure prise de décision, un grand nombre d'outils d'aide à la décision en conception ont été développés.

Approche	Nb.	Catégorie	Indicateur (nom proposé pour le classement)	Indicateur (nom tel que défini par la méthode)	Références				
Technique	22	Préservation de la masse	Taux de réutilisabilité	1	Taux de réutilisabilité	(Ardente <i>et al.</i> 2014)			
			Taux de recyclabilité	6	Taux de recyclabilité	(Ardente <i>et al.</i> 2014)			
					Taux de recyclabilité		(IEC 2012)		
					Taux de recyclabilité		(ISO 2002)		
					Préservation de la masse		(Maris <i>et al.</i> 2013)		
					Valorisation massique (recyclage)		(Mathieux <i>et al.</i> 2008)		
					Taux de recyclabilité		(Umeda <i>et al.</i> 2013)		
			15	Taux de valorisabilité	8	Taux de valorisation théorique	(Alonso Movilla <i>et al.</i> 2013)		
					Taux de valorisation pratique				
					Taux de valorisation affecté				
					Taux de valorisabilité		(Ardente <i>et al.</i> 2014)		
					Taux massique potentiel de valorisation		(Chemineau 2011)		
					Taux de valorisabilité		(IEC 2012)		
					Taux de valorisabilité		(ISO 2002)		
					Valorisation massique (valorisation)		(Mathieux <i>et al.</i> 2008)		
				Préservation de la qualité (des propriétés)	1	Préservation de l'exergie	(Maris <i>et al.</i> 2013)		
				Recyclabilité		Recyclabilité du produit	2		
					4	Taux de recyclage total	(Dostatni <i>et al.</i> 2016)		
						Recyclabilité	(Zeng <i>et al.</i> 2016)		
						Recyclabilité des matériaux	1		
						Niveau de difficulté de recyclage	1		
						Difficulté de recyclage	(Zeng <i>et al.</i> 2016)		
		Démontabilité	1	Démontabilité du produit	(De Aguiar <i>et al.</i> 2017)				
		Contenu de matière recyclée	1	Taux de contenu recyclé	(Ardente <i>et al.</i> 2014)				
Environnementale	7	Toxicité de substances utilisées	1	Toxicité de substances utilisées	1	Utilisation de substances nocives	(Ardente <i>et al.</i> 2014)		
		Valeur environnementale du traitement en fin de vie		Impact environnemental du traitement en fin de vie	2	QWERTY	(Huisman <i>et al.</i> 2003)		
			5	Bénéfice environnemental du traitement en fin de vie	3	Taux de bénéfice (env.) de la réutilisabilité	(Ardente <i>et al.</i> 2014)		
						Taux de bénéfice (env.) de la recyclabilité			
						Taux de bénéfice (env.) de la valorisabilité			
				Valeur environnementale du contenu recyclé	1	Bénéfice environnemental du contenu recyclé	1	Taux de bénéfice (env.) du contenu recyclé	(Ardente <i>et al.</i> 2014)
				Valeur économique du traitement en fin de vie		Efficacité économique du traitement en fin de vie	1	Efficacité économique	(Huisman <i>et al.</i> 2003)
Économique	9			Rentabilité (bénéfice) du traitement en fin de vie	4	Bénéfice net du recyclage	(Chen <i>et al.</i> 1993)		
					6	Rentabilité potentielle	(Chemineau 2011)		
						Valorisabilité économique	(Mathieux <i>et al.</i> 2008)		
						Coût de recyclage	(Dostatni <i>et al.</i> 2016)		
						Rapport bénéfice-coût du traitement en fin de vie	1	Rapport bénéfice-coût de recyclage	(Chen <i>et al.</i> 1993)
				Valeur économique de la matière		Dévaluation de la matière utilisée	1	Dévaluation	(Villalba <i>et al.</i> 2002)
					3	Préservation de la valeur économique de la matière recyclée	1	Préservation de la valeur économique	(Maris <i>et al.</i> 2013)
				Rapport prix matière recyclée-vierge	1	Indice de recyclage	(Villalba <i>et al.</i> 2002)		

Tableau 19. Classement par catégories d'indicateurs utilisés pour évaluer la valorisabilité d'un produit en fin de vie

Les démarches de conception pour X ont pour but d'apporter aux concepteurs des connaissances et expertises complémentaires aux siennes pour l'orienter vers les bons choix de conception. Elles sont généralement présentées sous la forme de lignes directrices (*guidelines* ou *heuristiques*³⁰ de conception). Elles présentent une forme explicite de connaissances et intègrent des informations sur le savoir-faire. Chacune aborde une problématique spécifique du produit et propose une approche ou une méthode pouvant aider à contrôler, améliorer ou éliminer le problème en question.

Les lignes directrices associées aux démarches de conception pour X forment aujourd'hui l'outil d'aide à la décision en conception le plus utilisé et le plus répandu dans le cadre d'une démarche d'écoconception ou d'une conception pour la fin de vie. Elles visent à guider le concepteur en lui proposant des conseils pour optimiser son produit (voir Chapitre 2, § 3.2.1). Cependant, la tâche est ardue. En effet, il existe un grand nombre de lignes directrices pour un même objectif d'amélioration et le concepteur dispose rarement des informations nécessaires lui permettant de choisir la plus adaptée à ses besoins.

Les lignes directrices contiennent de façon indirecte l'ensemble des leviers d'action dont le concepteur dispose pour améliorer X (p. ex. certaines caractéristiques du produit tel que sa démontabilité ou sa diversité des matériaux). Il semble ainsi nécessaire et cohérent de savoir si les caractéristiques du produit que l'on souhaite ou doit modifier (car ce sont nos leviers d'action) sont performantes par rapport aux objectifs ou par rapport à une référence. Une évaluation de la performance du produit par rapport aux leviers d'action identifiés peut donc permettre non seulement l'identification des *hotspots* du produit (p. ex. les composants les moins performants vis-à-vis de leur traitement en fin de vie), mais aussi de fournir la ou les lignes directrices à utiliser dans cette problématique spécifique (c.-à-d. la caractéristique à traiter).

Nous proposons donc d'identifier dans cette partie les leviers d'action qui correspondent aux lignes directrices dans l'optique d'associer ensuite les indicateurs aux leviers d'action identifiés, et mesurer ainsi la performance du produit vis-à-vis de ces paramètres. Toutefois, notre analyse ne se limite pas uniquement aux leviers d'action en conception mais aussi aux contraintes réglementaires dont le concepteur est obligé de garantir la conformité. Cette problématique est ainsi étudiée en deux étapes, les leviers d'action associées à une démarche d'écoconception sont d'abord identifiées (§ 3.1) et son adéquation aux indicateurs de valorisabilité est ensuite vérifiée (§ 3.1.4).

3.1. Leviers d'action et contraintes réglementaires associés à une démarche d'écoconception pour la fin de vie

Écoconcevoir un produit pour la fin de vie implique de le (re)concevoir pour qu'il puisse être valorisé au mieux lors qu'il sera en fin de vie. De plus, cette valorisation doit être pertinente sur les plans économique et environnemental. Elle doit enfin d'inscrire dans la hiérarchie de traitement des déchets (voir figure 40) tel que proposé par la Directive 2008/98/CE (Parlement Européen et Conseil de l'Union Européenne 2008).

L'identification des leviers d'action du concepteur (c.-à-d. les éléments sur quoi il peut agir) sera menée à partir de l'étude de lignes directrices de conception pour la fin de vie ; elles contiennent en effet les critères à prendre en compte pour améliorer les différentes opérations de traitement.

³⁰ Qui sert à la découverte, qui a pour objet les processus de recherche et de découverte.



Figure 40. Hiérarchie de traitement des déchets

Pour pouvoir définir ce qu'il est important d'analyser, il faut bien comprendre l'objectif poursuivi par chaque voie de valorisation. En effet, le degré de valorisation visé par chaque voie et les traitements associés ne sont pas les mêmes. Les besoins d'amélioration à mettre en avant sont ainsi nécessairement différents. C'est pourquoi, il a été décidé d'étudier les démarches de conception par voie de valorisation (c.-à-d. conception pour les valorisations fonctionnelle, matière et énergétique, et conception pour l'élimination).

3.1.1. Identification des leviers d'action associés à une démarche de conception pour la fin de vie

Dans ce cadre, un état de l'art des lignes directrices de conception pour la fin de vie a été réalisé. 381 lignes directrices (issues de onze études) ont été identifiées, regroupées et classées selon la voie de valorisation envisagée. Le bilan de cette étude est proposé dans le paragraphe suivant et reprendra par thèmes, les lignes directrices associées et les leviers d'actions identifiés.

3.1.1.1. Conception pour la valorisation fonctionnelle

La *valorisation fonctionnelle* (voir Chapitre 1, § 3.4.2.3.1) vise le degré optimal de préservation de la valeur pour le produit (valorisation fonctionnelle *totale*), ses modules ou ses composants (valorisation fonctionnelle *partielle*). La réutilisation est trop souvent considérée comme la seule voie de traitement dans cette voie de valorisation. Cependant, la remise à neuf, le reconditionnement, la montée en gamme et la réaffectation sont d'autres voies à ne pas négliger.

La *conception pour la valorisation fonctionnelle* intègre alors toutes les démarches de conception permettant de prolonger la durée de vie du produit complet ou de ses modules conservant ainsi toute sa valeur fonctionnelle (voir Chapitre 2, § 3.2.1.2). Il y a donc plusieurs approches possibles qui correspondent à la conception pour la valorisation fonctionnelle. Certaines de ces démarches cherchent à accroître la performance de l'une des étapes de traitement comme la conception pour la fin de vie, la modularité, la maintenance, la réparabilité, le désassemblage, l'assemblage et le réassemblage, la réutilisation, le reconditionnement, la montée en gamme, l'adaptabilité et la réaffectation. D'autres visent à augmenter la durée de vie du produit dès sa conception, telles que la conception pour plusieurs cycles de vie, la durée de vie et la fiabilité. Un bilan de lignes directrices de conception pour la valorisation fonctionnelle et des leviers d'action associés est présenté dans le tableau 20.

Champ d'action	Levier d'action	Lignes directrices	Voie de traitement concernée	Références
Produit	Complexité	Minimiser le nombre de composants	Toutes	(Dombrowski, Schmidt, et Schmidtchen 2014) (Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Modularité	Rendre le produit aussi modulaire que possible (avec séparation des fonctions)	Toutes	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Démontabilité	Réduire le temps et le nombre d'étapes de démontage	Toutes	(Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Wimmer et Züst 2001)
		Augmenter la linéarité de la séquence de démontage	Toutes	(Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
		Minimiser les divergences de sens de la séquence de démontage	Toutes	(Vezzoli et Manzini 2008)
		Homogénéiser les principes d'assemblage et de désassemblage	Toutes	(Wimmer et Züst 2001)
		Concevoir le produit de manière à ce qu'il puisse être transporté facilement après son utilisation (c.-à-d. en permettant un prédémontage)	Toutes	(Kriwet, Zussman, et Seliger 1995)
	Réutilisabilité	Concevoir le produit pour multiples usages	Toutes	(Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)
	Capacité à monter en gamme	Permettre et faciliter la montée en gamme du produit (hardware et software)	Montée en gamme	(Vezzoli et Manzini 2008)
	Réaffectabilité	Concevoir un produit multifonctionnel et configurable dynamiquement	Réaffectation	(Vezzoli et Manzini 2008)
Composants	Repérabilité ³¹	Les consommables ainsi que les composants avec une valeur économique élevé ou ceux qui sont facilement endommageables doivent être facilement identifiables	Toutes	(Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Pôle éco-conception 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Accessibilité	Les consommables ainsi que les composants avec une valeur économique élevé ou ceux qui sont facilement endommageables doivent être facilement accessibles	Toutes	(Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Démontabilité	Les consommables ainsi que les composants avec une valeur économique élevé ou ceux qui sont facilement endommageables doivent être facilement enlevés	Toutes	(Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Pôle éco-conception 2015) (Vezzoli et Manzini 2008) (Wimmer et Züst 2001)
		Concevoir les pièces pour la stabilité lors du démontage	Toutes	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)
	Standardisation	Utiliser des composants standard ou les concevoir selon les normes	Toutes	(Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
Fixations	Complexité	Minimiser le nombre de fixations	Toutes	(Dombrowski, Schmidt, et Schmidtchen 2014) (Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Diversité	Minimiser le nombre total de différents types de fixations	Toutes	(Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Repérabilité	Les fixations doivent être facilement repérables	Toutes	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Wimmer et Züst 2001) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Accessibilité	Les fixations doivent être facilement accessibles (y compris l'espace nécessaire pour l'outil de démontage)	Toutes	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Kriwet, Zussman, et Seliger 1995) (Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007) (Wimmer et Züst 2001) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Démontabilité	Les fixations doivent être faciles à enlever	Toutes	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Masanet et al. 2002) (Kriwet, Zussman, et Seliger 1995) (Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007) (Wimmer et Züst 2001) (Vezzoli et Manzini 2008)

³¹ On définit ici la repérabilité comme l'aptitude d'un composant à être repéré

	Remontabilité	Les fixations doivent être réversibles	Toutes	(Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Durabilité	Protéger les fixations contre la corrosion et l'usure	Toutes	(Kriwet, Zussman, et Seliger 1995)
	Diversité	Minimiser le nombre d'outils de démontage des fixations nécessaires	Toutes	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)
	Standardisation	Favoriser l'utilisation d'outils de démontage standards	Toutes	(Dombrowski, Schmidt, et Schmidtchen 2014) (Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Kriwet, Zussman, et Seliger 1995) (Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007) (Vezzoli et Manzini 2008)
Câbles et connecteurs	Complexité	Minimiser le nombre et la longueur des fils ou câbles d'interconnexion utilisés	Toutes	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)
	Informations	Communication	Fournir des informations utiles au traitement	Toutes
			Fournir à l'utilisateur des informations sur les modalités de traitement du produit ou de ses parties	Toutes

Tableau 20. Bilan de lignes directrices de la conception pour la valorisation fonctionnelle.

Les lignes directrices de conception pour la valorisation fonctionnelle y ont été organisées en cinq catégories :

- *Produit*. Les leviers d'action associés concernent des caractéristiques du produit comme d'une part sa complexité, sa modularité et sa démontabilité, et d'autre part son aptitude à être valorisé fonctionnellement (réutilisabilité, capacité à monter en gamme et réaffectabilité) ;
- *Composants*. Ici les leviers d'action sont centrés sur la réparabilité, l'accessibilité, la démontabilité et la standardisation des composants à valeur économique élevée ou facilement endommageables ;
- *Fixations*. Les leviers d'action sont associés d'une part aux fixations (complexité du système de fixation et diversité, réparabilité, accessibilité, démontabilité et remontabilité, et durabilité), et d'autre part aux outils de démontage (diversité et types d'outils (standards ou spéciaux)). Cette catégorie s'intéresse donc aux leviers permettant de simplifier le démontage et/ou remontage des fixations, et donc l'assemblage/désassemblage du produit ou du module ;
- *Câbles et connecteurs*. Le seul levier d'action identifié pour cette catégorie est la complexité du système de câblage ;
- *Informations*. Cette dernière catégorie aborde des leviers d'action qui n'impliquent pas le produit lui-même mais la communication des informations utiles sur sa fin de vie, à destination des utilisateurs du produit et des acteurs de la filière.

3.1.1.2. Conception pour la valorisation matière

La *valorisation matière* (voir Chapitre 1, § 3.4.2.3.2) vise à préserver la valeur ajoutée contenue dans les différents matériaux en s'assurant de la compatibilité entre matériaux et en minimisant les refus de tri (Pôle éco-conception 2015). Elle a pour objectif idéal de rendre toute la matière constitutive du produit sous forme de matière première secondaire. Les flux de matière forment alors une boucle fermée (conformément à ce que prône l'économie circulaire), assurant ainsi la préservation des matières premières primaires.

Le bon fonctionnement de voie de valorisation est impacté par plusieurs problématiques : celles associées aux étapes de prétraitement (dépollution, désassemblage, broyage et tri) d'une part, ainsi que celles des voies de traitement (p. ex. le recyclage) d'autre part. La performance de chaque opération est ainsi affectée par différents facteurs dont les principaux sont listés ci-dessous et représentés dans la figure 41 sous forme de diagramme cause-effet :

- la *dépollution* dépend principalement du temps d'identification, de la clarté et durabilité des consignes et du temps de démontage ;
- le *démontage* est aussi affecté par le temps d'identification et le temps de démontage ;
- le *broyage* est influencé par l'aptitude à la fragmentation du produit ainsi que par l'énergie nécessaire à cette fragmentation ;
- le *tri* est impacté par la différence de propriétés physiques entre chaque matière du broyat (p. ex. le magnétisme des métaux ferreux, la différence de densité entre matériaux, etc.) et très dépendante de la qualité du broyage ;
- le *recyclage* est principalement affecté par l'aptitude du matériau à être régénéré ainsi que par la compatibilité entre matériaux, c'est-à-dire entre le matériau à recycler d'une part, et (i) des différentes nuances du même matériau, (ii) des impuretés qui n'ont pas été séparées lors de la phase de broyage/tri et (iii) de ses traitements de surface d'autre part. (Pôle éco-conception 2015)

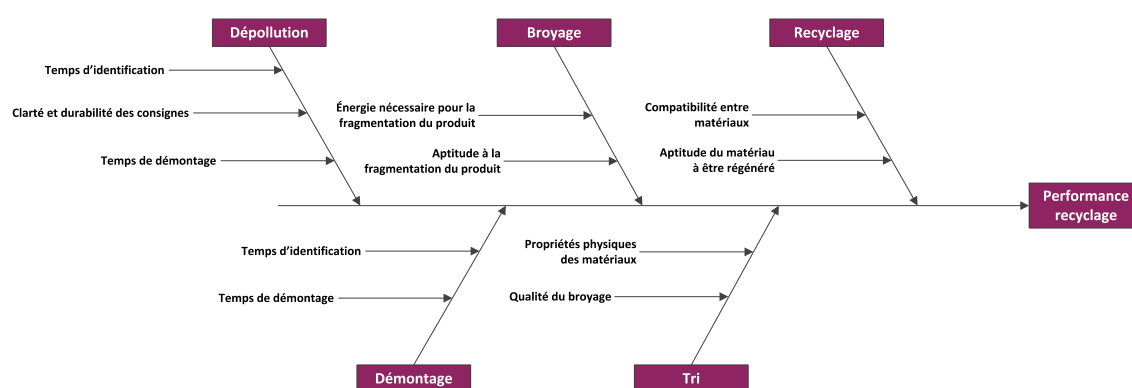


Figure 41. Diagramme cause-effet de la performance du recyclage

La *conception pour la valorisation matière* s'intéresse donc à modifier le produit pour augmenter les possibilités de récupérer et régénérer les matériaux du produit en fin de vie à partir de la connaissance de la filière de traitement et de ses performances (voir Chapitre 2, § 3.2.1.2). Un bilan de lignes directrices de conception pour la valorisation matière est présenté dans le tableau 21.

Champ d'action	Levier d'action	Lignes directrices	Voie de traitement concernée	Références
Produit	Complexité	Minimiser le nombre de composants	Recyclage	(Dombrowski, Schmidt, et Schmidtchen 2014) (Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Modularité	Rendre le produit aussi modulaire que possible (avec séparation des matériaux)	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Démontabilité	Réduire le temps et le nombre d'étapes de démontage	Recyclage	(Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Wimmer et Züst 2001)
		Augmenter la linéarité de la séquence de démontage	Recyclage	(Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
		Minimiser les divergences de sens de la séquence de démontage	Recyclage	(Vezzoli et Manzini 2008)
	Homogénéiser les principes d'assemblage et de désassemblage	Recyclage	(Wimmer et Züst 2001)	

Champ d'action	Levier d'action	Lignes directrices	Voie de traitement concernée	Références
		Concevoir le produit de manière à ce qu'il puisse être transporté facilement après son utilisation (c.-à-d. en permettant un prédémontage)	Recyclage	(Kriwet, Zussman, et Seliger 1995)
Composants	Repérabilité	Les composants contenant des matériaux non recyclables, non compatibles, toxiques, précieux, rares et critiques doivent être facilement identifiables	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Masanet et al. 2002) (Pôle éco-conception 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Accessibilité	Les composants contenant des matériaux non recyclables, non compatibles, toxiques, précieux, rares et critiques doivent être facilement accessibles	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Démontabilité	Les composants contenant des matériaux non recyclables, non compatibles, toxiques, précieux, rares et critiques doivent être facilement enlevés	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007) (Pôle éco-conception 2015) (M. A. Reuter et van Schaik 2015) (Vezzoli et Manzini 2008) (Wimmer et Züst 2001)
		Lorsque les matériaux des pièces ou des sous-ensembles inséparables ne sont pas compatibles, faire en sorte qu'ils soient facilement séparables	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007) (M. A. Reuter et van Schaik 2015)
		Concevoir les pièces pour la stabilité lors du démontage	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)
	Matériaux	Diversité	Minimiser le nombre de différents types de matériaux	Recyclage
Éviter le mélange des matériaux dans les assemblages			Recyclage	(Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)
Stratégie monomatériau. Privilégier un seul matériau par produit ou sous-ensemble			Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Masanet et al. 2002) (Vezzoli et Manzini 2008)
Compatibilité		Utiliser des matériaux compatibles (qui peuvent être recyclés ensemble) dans le produit ou le sous-ensemble	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Masanet et al. 2002) (Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007) (M. A. Reuter et van Schaik 2015) (Vezzoli et Manzini 2008) (Wimmer et Züst 2001)
		Utiliser des fixations faites d'un matériau compatible avec les pièces assemblées	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007) (Vezzoli et Manzini 2008)
Recyclabilité		Utiliser des matériaux recyclables	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Kriwet, Zussman, et Seliger 1995) (Vezzoli et Manzini 2008) (Wimmer et Züst 2001)
		Choisir des matériaux qui peuvent récupérer facilement leurs propriétés originelles après le recyclage	Recyclage	(Vezzoli et Manzini 2008)
Utilisation de matières recyclées		Utiliser des matériaux recyclés	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
Toxicité		Éviter ou réduire l'utilisation des substances, matériaux ou composants nocifs pour l'homme ou pour l'environnement	Recyclage	(Dombrowski, Schmidt, et Schmidtchen 2014) (Kriwet, Zussman, et Seliger 1995) (Wimmer et Züst 2001)
Circularité		Conception tenant compte de l'utilisation secondaire des matières recyclées	Recyclage	(Vezzoli et Manzini 2008)

Champ d'action	Levier d'action	Lignes directrices	Voie de traitement concernée	Références
Fixations	Complexité	Minimiser le nombre de fixations	Recyclage	(Dombrowski, Schmidt, et Schmidtchen 2014) (Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Diversité	Minimiser le nombre total de différents types de fixations	Recyclage	(Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Repérabilité	Les fixations doivent être facilement repérables	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Wimmer et Züst 2001) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Accessibilité	Les fixations doivent être facilement accessibles (y compris l'espace nécessaire pour l'outil de démontage)	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Kriwet, Zussman, et Seliger 1995) (Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007) (Wimmer et Züst 2001) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Démontabilité	Les fixations doivent être faciles à enlever	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Masanet et al. 2002) (Kriwet, Zussman, et Seliger 1995) (Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007) (Wimmer et Züst 2001) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Diversité	Minimiser le nombre d'outils de démontage des fixations nécessaires	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)
	Standardisation	Favoriser l'utilisation d'outils de démontage standards	Recyclage	(Dombrowski, Schmidt, et Schmidtchen 2014) (Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Kriwet, Zussman, et Seliger 1995) (Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Durabilité	Protéger les fixations contre la corrosion et l'usure	Recyclage	(Kriwet, Zussman, et Seliger 1995)
Câbles et connecteurs	Complexité	Minimiser le nombre et la longueur des fils ou câbles d'interconnexion utilisés	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)
Marquage et étiquetage	Identification	Codification et marquage (standardisé) des matériaux pour faciliter leur identification (notamment les pièces en plastique et similaires)	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Masanet et al. 2002) (Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007) (Vezzoli et Manzini 2008) (Wimmer et Züst 2001)
		Étiquetage (normalisé) des produits et composants sur les possibilités de recyclage, incompatibilité et/ou la toxicité afin qu'ils puissent être facilement identifiés des recyclables et des flux de déchets	Recyclage	(Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007) (M. A. Reuter et van Schaik 2015)
		Éliminer les étiquettes incompatibles avec le traitement de fin de vie	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)
		Disposer les éléments d'identification dans des endroits facilement visibles	Recyclage	(Vezzoli et Manzini 2008)
Informations	Communication	Fournir des informations utiles au traitement	Recyclage	(Wimmer et Züst 2001)
		Fournir à l'utilisateur des informations sur les modalités de traitement du produit ou de ses parties	Recyclage	(Wimmer et Züst 2001)

Tableau 21. Bilan de lignes directrices de conception pour la valorisation matière.

Les lignes directrices de conception pour la valorisation matière ont été organisées en sept catégories selon le champ d'action concerné (voir tableau 21). Les cinq premières (produit, composants, matériaux, fixations et câbles et connecteurs) portent sur des choix de conception ; les deux autres (marquage et étiquetage, informations) concernent la transmission d'informations aux différents acteurs impliqués dans la fin de vie du produit (c.-à-d. du dernier détenteur aux acteurs de la filière de traitement) pour rendre le processus de

traitement plus efficace. Les catégories et leviers d'action identifiés se situent aux échelles et niveaux suivants :

- *Produit*. Les leviers d'action dépendent uniquement des caractéristiques propres au produit, comme sa complexité, sa modularité et sa démontabilité ;
- *Composants*. Ici les leviers d'action sont centrés sur la réparabilité, l'accessibilité, la démontabilité et la remplaçabilité de composants contenant des matériaux non recyclables, non compatibles, toxiques, précieux, rares et critiques ;
- *Matériaux*. Cette catégorie s'intéresse principalement au choix des matériaux. Les leviers identifiés sont la diversité, la compatibilité, la recyclabilité, la toxicité et la circularité des matériaux ainsi que l'utilisation de matières recyclées ;
- *Fixations*. Les leviers d'action sont associés d'une part aux fixations (complexité du système de fixation et diversité, réparabilité, accessibilité et démontabilité des fixations) et d'autre part aux outils de démontage (diversité et type d'outils). Cette catégorie concerne donc les leviers d'actions permettant de simplifier le démontage des fixations ;
- *Câbles et connecteurs*. Comme pour la valorisation fonctionnelle le seul levier d'action identifié pour cette catégorie est la complexité du système de câblage ;
- *Marquage et étiquetage*. Cette catégorie a pour levier d'action la mise en place des systèmes d'identification des composants et des matériaux recyclables et/ou problématiques ;
- *Informations*. De même que pour la valorisation fonctionnelle, cette catégorie aborde la communication des informations utiles, concernant la fin de vie du produit, aux utilisateurs et aux acteurs de la filière.

3.1.1.3. Conception pour la valorisation énergétique

La *valorisation énergétique* (voir Chapitre 1, § 3.4.2.3.3) est l'avant dernière voie de valorisation. Elle est réservée aux déchets dont la valeur fonctionnelle et matière ne peut être préservée. L'objectif est donc de récupérer de l'énergie à partir d'une opération d'incinération (production de l'énergie électrique et thermique) ou d'une méthanisation (production du biogaz).

La *conception pour la valorisation énergétique* a pour objectif d'une part de minimiser la part résiduelle n'ayant débouché ni en valorisation fonctionnelle, ni en valorisation matière, et d'autre part d'améliorer la performance des opérations de valorisation associées (Chapitre 2, § 3.2.1.2). Les opérations en fin de vie concernées par cette démarche de conception sont le prétraitement, l'incinération (avec valorisation énergétique) et la méthanisation. Un bilan de lignes directrices et des leviers d'action associés à la conception pour la valorisation énergétique est présenté dans le tableau 22. Elles sont organisées en deux catégories selon le champ d'action visé. Il peut être constaté que les leviers d'action du concepteur sont centrés principalement sur le choix de matériaux pour

- l'incinération. Les leviers d'action identifiés sont la démontabilité des composants d'une part, et la recyclabilité, la rareté, l'inflammabilité, le pouvoir calorifique et la toxicité des matériaux d'autre part ;
- ou la méthanisation. Les leviers d'action identifiés sont la toxicité la biodégradabilité et le potentiel méthanogène de la matière.

Champ d'action	Levier d'action	Lignes directrices	Voie de traitement concernée	Références
Composants	Démontabilité	Faciliter la séparation des composants contenant des matériaux qui pourraient compromettre l'efficacité de la combustion (faible valeur énergétique)	Incinération	(Vezzoli et Manzini 2008)
Matériaux	Recyclabilité	Privilégier l'utilisation des matériaux et substances recyclables pour minimiser la part résiduelle arrivant à cette voie de valorisation	Incinération	(Pôle éco-conception 2015)
	Rareté	Privilégier l'utilisation des matériaux abondants au lieu de matériaux rares	Incinération	-
	Inflammabilité	Réduire le nombre des matériaux et substances inflammables à 800°C	Incinération	(Pôle éco-conception 2015)
	Pouvoir calorifique	Choisir des matériaux et substances à haute énergie et vérifier leur adéquation aux performances de l'incinérateur	Incinération	(Pôle éco-conception 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Toxicité	Éviter les matériaux et substances qui émettent des substances toxiques lors de l'incinération et la méthanisation	Toutes	(Pôle éco-conception 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Biodégradabilité	Privilégier l'utilisation des matériaux et substances biodégradables	Méthanisation	(Pôle éco-conception 2015)
	Potentiel méthanogène	Choisir des matériaux et substances à haut potentiel méthanogène	Méthanisation	-

Tableau 22. Bilan de lignes directrices de conception pour la valorisation énergétique.

Parmi les leviers d'action identifiés, certains cherchent à établir une bonne adéquation entre les propriétés des déchets à incinérer et les installations d'incinération pour assurer une bonne performance de traitement :

- La démontabilité vise à ce que les composants contenant des matériaux qui nuisent au bon fonctionnement des centres d'incinération puissent être enlevés facilement lors de l'opération de dépollution et de démontage ;
- L'inflammabilité des matériaux est un facteur important pour l'opération d'incinération. Si un matériau ne brûle pas dans l'incinérateur, cela induira des effets négatifs par la captation d'énergie. Notons à ce sujet que les fours utilisés pour l'incinération montent à une température d'environ 800°C. Il faut donc s'assurer d'un taux convenable de matière inflammable à 800°C pour garantir le bon fonctionnement des installations ;
- Le pouvoir calorifique est un autre facteur important à prendre en compte pour l'opération d'incinération car ces installations sont généralement dimensionnées pour un certain pouvoir calorifique inférieur (PCI³²). En outre, il est essentiel de bien différencier les incinérateurs d'ordures ménagères (à PCI faible) et les incinérateurs des déchets industriels (à PCI fort). (Pôle éco-conception 2015).

Dans la même optique, d'autres leviers d'action permettent d'établir une bonne adéquation entre les propriétés des déchets et les installations de méthanisation :

- la biodégradabilité des matériaux est importante pour cette voie de traitement car les déchets concernés sont des matières organiques susceptibles d'être décomposées (ADEME 2015b) ;
- le potentiel méthanogène des matériaux est un facteur à prendre en compte car la rentabilité d'un méthaniseur repose sur le choix d'une recette (c.-à-d. la ration alimentaire du digesteur) dont le potentiel méthanogène est l'un des principaux paramètres qui déterminent son équilibre (ADEME 2017d).

Certains leviers enfin visent à trouver des solutions pour préserver la valeur (notamment celle des matériaux) :

³² Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) est une propriété d'un combustible caractérisant la quantité théorique d'énergie qu'il peut libérer. Il est mesuré à partir de la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible. Le PCI est surtout utilisé en Europe. D'autres pays comme les États-Unis d'Amérique et le Canada, préfèrent considérer le pouvoir calorifique supérieur (PCS).

- La recyclabilité des matériaux est importante ici dans le but de réduire la part résiduelle destinée à la valorisation énergétique. En effet, les déchets qui arrivent dans cette voie n'ont pas pu être valorisés autrement et toute leur valeur ajoutée sera perdue lors de l'incinération ;
- Connaître la rareté de la matière est important pour de réduire la problématique d'approvisionnement des ressources. Il faut éviter que les matériaux rares intègrent cette voie de valorisation puisqu'elle ne permet pas de fermer la boucle et les matériaux seront donc perdus. (Pôle éco-conception 2015)

Enfin, la toxicité des matériaux est aussi considérée parmi les leviers d'action. Elle est importante pour anticiper et éviter

- d'une part, les effets négatifs des cendres et des fumées générées par la combustion des résidus destinés à l'incinération ;
- d'autre part, la contamination des sols par des substances toxiques générées par les résidus destinés à la méthanisation.

3.1.1.4. Conception pour l'élimination

L'*élimination* des déchets (c.-à-d. leur non valorisation ; voir Chapitre 1, § 3.4.2.3.4) est la dernière voie de la hiérarchie de traitement des déchets. Elle est donc réservée aux déchets ultimes pour lesquels aucune autre valorisation n'est possible (Ministère de la Transition écologique et solidaire 2019). Il existe deux possibilités d'élimination : l'incinération sans valorisation énergétique et la mise en décharge.

La *conception pour l'élimination* a pour mission de minimiser d'une part la part résiduelle n'ayant de débouché dans aucune des autres voies de valorisation, et d'améliorer d'autre part la performance des opérations de traitement associées à l'élimination effective des déchets ultimes (voir Chapitre 2, § 3.2.1.2). Les opérations de fin de vie concernées par cette démarche de conception sont le prétraitement, l'incinération (sans valorisation énergétique) et l'enfouissement.

Les lignes directrices liées à l'incinération ont été déduites de celles définies pour la valorisation énergétique. En effet même si dans l'incinération pour l'élimination il n'y a pas de récupération d'énergie, les considérations à prendre en compte restent équivalentes.

Une synthèse de lignes directrices de conception pour l'élimination et des leviers de conception associés est présentée dans le tableau 23. Elles sont organisées en deux catégories selon le champ d'action visé. Comme pour la valorisation énergétique, les leviers d'action du concepteur sont centrés principalement sur le choix de matériaux pour

- l'incinération. Les leviers d'action identifiés sont les mêmes que ceux décrits dans le paragraphe précédent (§ 3.1.1.3) ;
- ou la méthanisation. Les leviers d'action identifiés sont la toxicité la biodégradabilité et le potentiel méthanogène de la matière.

Champ d'action	Levier d'action	Lignes directrices	Voie de traitement concernée	Références
Composants	Démontabilité	Faciliter la séparation des composants contenant des matériaux et substances qui pourraient compromettre l'efficacité de la combustion (avec une faible valeur énergétique)	Incinération	(Vezzoli et Manzini 2008)
Matériaux	Rareté	Privilégier l'utilisation des matériaux abondants au lieu de matériaux rares	Toutes	(Pôle éco-conception 2015)
	Inflammabilité	Réduire le nombre des matériaux et substances inflammables à 800°C	Incinération	(Pôle éco-conception 2015)
	Pouvoir calorifique	Choisir des matériaux et substances à haute énergie et vérifier leur adéquation aux performances de l'incinérateur	Incinération	(Pôle éco-conception 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Toxicité	Éviter les matériaux et substances qui émettent des substances toxiques lors de l'incinération et le stockage	Toutes	(Pôle éco-conception 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Biodégradabilité	Privilégier l'utilisation des matériaux et substances biodégradables	Stockage	(Pôle éco-conception 2015)

Tableau 23. Bilan de lignes directrices de conception pour l'élimination.

De même que pour la valorisation énergétique, certains leviers permettent d'établir une bonne adéquation entre les propriétés des déchets et les installations de traitement :

- pour l'incinération, les leviers d'action identifiés sont les mêmes que ceux décrits dans le paragraphe précédent (§ 3.1.1.3) ;
- pour le stockage, la biodégradabilité est un levier d'action intéressant, d'une part dans la perspective de réduire dans le temps la part de volume occupé par les déchets dans l'installation de stockage, et d'autre part en vue d'une possible valorisation du méthane issu de cette dégradation. (Pôle éco-conception 2015)

Tout comme dans la valorisation fonctionnelle, il faut éviter que les matériaux rares empruntent cette voie de valorisation car ces matériaux seront perdus. (Pôle éco-conception 2015). C'est pourquoi la rareté des matériaux est aussi un point central de la réflexion pour réduire la problématique d'approvisionnement des ressources.

Enfin, la toxicité des matériaux est le levier d'action permettant d'éviter l'émission des substances toxiques lors de l'incinération et le stockage.

3.1.2. Identification des seuls leviers d'action environnementaux

L'écoconception ou conception pour l'environnement (voir Chapitre 2, § 3.2.1.3) cherche à minimiser les impacts environnementaux négatifs tout au long du cycle de vie du produit. L'écoconception pour la fin de vie s'intéresse plus particulièrement à l'amélioration du traitement du produit en fin de vie (d'un point de vue environnemental). Une synthèse de lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie et des leviers d'action associés est présentée dans le tableau 24.

Champ d'action	Levier d'action	Lignes directrices	Voie de traitement concernée	Références
Composants	Repérabilité	Les composants contenant des matériaux toxiques doivent être facilement identifiables	Recyclage	-
	Accessibilité	Les composants contenant des matériaux toxiques doivent être facilement accessibles	Recyclage	-
	Démontabilité	Les composants contenant des matériaux toxiques doivent être facilement enlevés	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015)
Matériaux	Utilisation de matières recyclées	Utiliser des matériaux recyclés	Recyclage	(Dowie et Simon 1994) (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
	Rareté	Privilégier l'utilisation des matériaux abondants au lieu de matériaux rares	Incinération, Stockage	(Pôle éco-conception 2015)
	Biodégradabilité	Privilégier l'utilisation des matériaux et substances biodégradables	Méthanisation, Stockage	(Pôle éco-conception 2015)
	Toxicité	Éviter ou réduire l'utilisation des substances, matériaux ou composants nocifs pour l'homme ou pour l'environnement	Recyclage	(Dombrowski, Schmidt, et Schmidtchen 2014) (Kriwet, Zussman, et Seliger 1995) (Wimmer et Züst 2001)
			Incinération, Méthanisation, Stockage	(Pôle éco-conception 2015) (Vezzoli et Manzini 2008)
Circularité	Conception tenant compte de l'utilisation secondaire des matières recyclées	Recyclage	(Vezzoli et Manzini 2008)	
Marquage et étiquetage	Identification	Étiquetage (normalisé) des produits et composants sur la toxicité afin qu'ils puissent être facilement identifiés des recyclables et des flux de déchets	Recyclage	(Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007) (M. A. Reuter et van Schaik 2015)
		Disposer les éléments d'identification dans des endroits facilement visibles	Recyclage	(Vezzoli et Manzini 2008)
Informations	Communication	Fournir des informations utiles au traitement	Recyclage	(Wimmer et Züst 2001)
		Fournir à l'utilisateur des informations sur les modalités de traitement du produit ou de ses parties	Recyclage	(Wimmer et Züst 2001)

Tableau 24. Bilan de lignes directrices de conception pour l'environnement.

Les lignes directrices de d'écoconception pour la fin de vie y sont organisées en quatre catégories selon le champ d'action concerné. Les deux premières (composants et matériaux) portent sur des choix de conception ; les deux autres (marquage et étiquetage, et informations) concernent la transmission d'informations aux différents acteurs impliqués dans la fin de vie du produit (c.-à-d. du dernier détenteur aux acteurs de la filière de traitement). Les leviers d'action identifiés sont les suivants :

- *Composants*. Les leviers d'action sont centrés sur la repérabilité, l'accessibilité, la démontabilité et la remplaçabilité de composants toxiques ;
- *Matériaux*. Cette catégorie se focalise principalement au choix de matériaux. Les leviers identifiés sont l'utilisation de matière recyclée, la rareté, la biodégradabilité, la toxicité et la circularité des matériaux ;
- *Marquage et étiquetage*. Cette catégorie s'intéresse à la mise en place des systèmes d'identification des composants et des matériaux toxiques ;
- *Informations*. Les leviers d'action identifiés sont les mêmes que ceux décrits pour les valorisations fonctionnelle et matière (voir § 3.1.1.1 et § 3.1.1.2).

3.1.3. Contraintes réglementaires

Les éléments techniques et environnementaux évoqués dans le paragraphe précédent ne sont pas les seuls à être pris en compte. En effet, les exigences réglementaires doivent aussi être considérées pour avoir une vision globale de l'ensemble des exigences devant être validées par le concepteur lors d'une démarche de conception pour la fin de vie.

Dans ce cadre, les concepteurs doivent s'assurer que la performance potentielle de valorisation de leurs produits est conforme aux objectifs de valorisation imposés par la réglementation (voir Chapitre 2, § 2.3.1). En

plus pour certaines catégories de produits, la législation interdit ou limite l'utilisation de plusieurs substances. Le bilan de contraintes réglementaires à prendre en compte en conception est présenté dans le tableau 25.

Champ d'action	Élément de validation	Contrainte réglementaire	Voie de traitement concernée	Références
Produit	Taux de réutilisabilité et recyclabilité	Pourcentage en masse d'un nouveau produit potentiellement apte à être réutilisé et recyclé	Réutilisation Recyclage	Directives spécifiques Par exemple : (Parlement Européen et Conseil de l'Union Européenne 2009; 2005)
	Taux de valorisabilité	Pourcentage en masse d'un nouveau produit potentiellement apte à être valorisé	Réutilisation Recyclage Incinération (avec récupération d'énergie)	Directives spécifiques Par exemple : (Parlement Européen et Conseil de l'Union Européenne 2009; 2005)
Matériaux	Concentration maximale tolérée	Limitation de l'utilisation de certaines substances nocives dans les produits	-	Directives spécifiques Par exemple : (Parlement Européen et Conseil de l'Union Européenne 2011)

Tableau 25. Bilan de contraintes réglementaires.

Il faut bien noter que nous ne cherchons plus dans cette partie à identifier les leviers d'action mais les éléments de validation, c'est-à-dire l'indicateur ou tout autre outil permettant de valider que la contrainte réglementaire a été respectée.

Dans le tableau 25, les contraintes réglementaires ont été organisées en deux catégories selon le champ d'action adressé. La première porte sur le niveau d'intégration potentielle du produit par la filière, et la deuxième sur les exigences de valorisation (potentielle) demandées aux fabricants. Les leviers d'action identifiés portent sur les éléments suivants :

- *Produit*. Les leviers d'action pour cette catégorie sont la réutilisabilité, la recyclabilité et la valorisabilité du produit ;
- *Matériaux*. Le seul levier d'action pour cette catégorie est la concentration maximale tolérée en substances nocives.

3.1.4. Synthèse de leviers d'action et contraintes réglementaires identifiés

L'analyse des démarches d'écoconception pour la fin de vie a permis d'identifier 33 leviers d'action. De plus, trois types de contraintes réglementaires ont été identifiés. La figure 42 propose une synthèse des leviers d'action et des contraintes réglementaires identifiés en précisant les voies de valorisation concernées.

La majorité des leviers d'action identifiés (31) sont centrés sur des choix de conception. Les deux autres se focalisent sur la transmission d'informations.

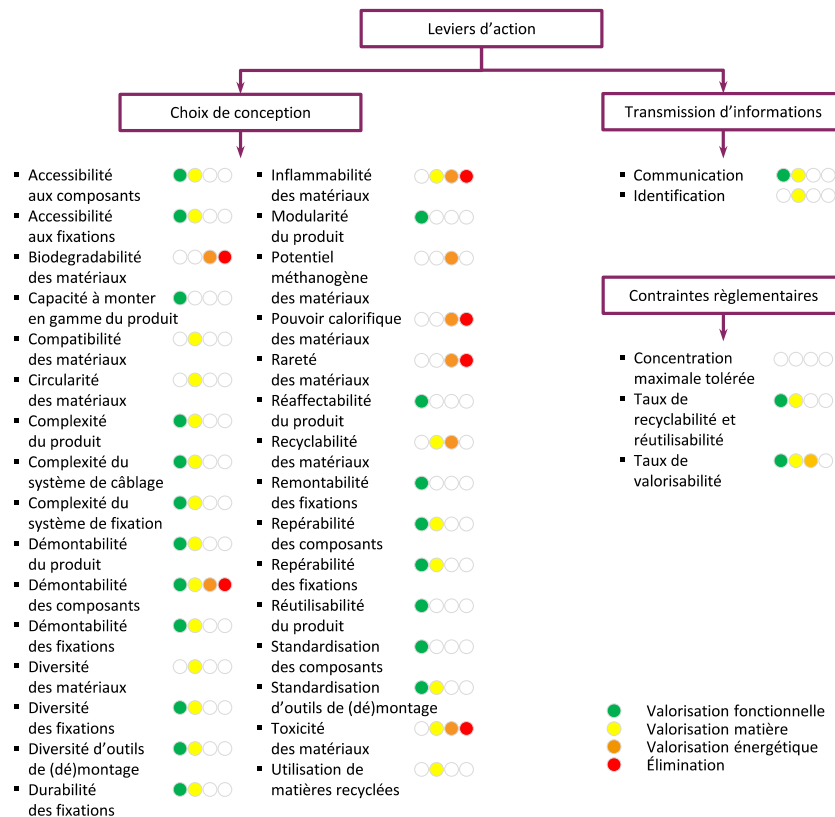


Figure 42. Représentation synoptique des leviers d'action et des contraintes réglementaires identifiés, par voie de valorisation concernée

3.2. Adéquation d'indicateurs de valorisabilité aux besoins d'analyse en conception

Dans cette partie, la correspondance entre les indicateurs d'évaluation de la valorisabilité d'un produit, les leviers d'action et les contraintes réglementaires identifiés est analysée. Ceci permet de vérifier si l'évaluation de la valorisabilité peut être utilisée comme un outil d'aide à la décision en conception permettant d'intégrer les contraintes et les opportunités induites par les filières de traitement en fin de vie. Un tel outil permettrait de créer un lien entre concepteurs et acteurs de la filière.

Le tableau 26 présente la correspondance entre les leviers d'action du concepteur et les indicateurs de valorisabilité identifiés.

Il peut être observé que seuls quatre indicateurs de valorisabilité correspondent à des leviers d'action en conception. En effet, la démontabilité du produit, la recyclabilité des matériaux, leur toxicité et l'utilisation des matières recyclées sont les seuls éléments pris en compte à la fois dans les méthodes d'évaluation de la valorisabilité d'un produit et dans les lignes directrices de conception.

De même, le tableau 27 confronte les éléments de validation réglementaires aux indicateurs de valorisabilité identifiés dans la littérature.

Chapitre 3
Hypothèses de solutions

Leviers d'action		Indicateurs de valorisabilité	
Catégorie (levier)	Levier	Catégorie (indicateur)	Indicateur
Accessibilité	Accessibilité des composants		
	Accessibilité des fixations		
Biodégradabilité	Biodégradabilité des matériaux		
Capacité à monter en gamme	Capacité à monter en gamme du produit		
Compatibilité	Compatibilité des matériaux		
Circularité	Circularité des matériaux		
Complexité	Complexité du produit		
	Complexité du système de fixation		
	Complexité du système de câblage		
Démontabilité	Démontabilité du produit	Démontabilité	Démontabilité du produit
	Démontabilité des composants		
	Démontabilité des fixations		
Diversité	Diversité des matériaux		
	Diversité des fixations		
	Diversité d'outils de (dé)montage		
Durabilité	Durabilité des fixations		
Inflammabilité	Inflammabilité des matériaux		
Modularité	Modularité du produit		
Potentiel méthanogène	Potentiel méthanogène des matériaux		
Pouvoir calorifique	Pouvoir calorifique des matériaux		
Rareté	Rareté des matériaux		
Réaffectabilité	Réaffectabilité du produit		
Recyclabilité	Recyclabilité des matériaux	Recyclabilité	Recyclabilité des matériaux
Remontabilité	Remontabilité des fixations		
Repérabilité	Repérabilité des composants		
	Repérabilité des fixations		
Réutilisabilité	Réutilisabilité du produit		
Standardisation	Standardisation des composants		
	Standardisation d'outils de (dé)montage		
Toxicité	Toxicité des matériaux	Toxicité de substances utilisées	Toxicité de substances utilisées
Utilisation de matières recyclées	Utilisation de matières recyclées	Contenu de matière recyclée	Taux de contenu recyclé

Tableau 26. Adéquation des leviers d'action aux indicateurs de valorisabilité

Contraintes réglementaires		Indicateurs de valorisabilité	
Catégorie	Élément de validation	Catégorie	Indicateur
Substances nocives limitées	Concentration maximale tolérée		
Valorisation du produit en fin de vie	Taux de recyclabilité et réutilisabilité	Préservation de la masse	Taux de recyclabilité
			Taux de réutilisabilité
	Taux de valorisabilité		Taux de valorisabilité

Tableau 27. Adéquation des éléments de validation des contraintes réglementaires aux indicateurs de valorisabilité

Ce tableau montre que contrairement aux leviers d'action, il y a une bien meilleure correspondance entre les indicateurs de valorisabilité et les éléments de validation des contraintes réglementaires. Ceci n'est pas surprenant car ces indicateurs ont été créés pour répondre à ce besoin spécifique. En revanche, il n'y pas d'indicateur permettant d'évaluer la concentration maximale tolérée en substances nocives. Cette absence peut être expliquée par le fait que l'évaluation de cette contrainte est assez simple ; il suffit en effet que le concepteur vérifie que la concentration de la substance concernée dans son produit est inférieure à la limite établie.

Si on analyse enfin ces adéquations dans l'autre sens, il peut être observé que des éléments sont étudiés par les méthodes d'évaluation de la valorisabilité d'un produit, mais ne sont abordés ni par les leviers d'action, ni par les contraintes réglementaires. Parmi ces éléments, on retrouve des critères techniques tels que la préservation de la qualité des propriétés, des éléments environnementaux comme les valeurs environnementales du traitement en fin de vie et du contenu recyclé, et des éléments économiques tels que les valeurs économiques du traitement en fin de vie et de la matière (vierge et recyclée).

4. Hypothèses de solution

Dans la première partie de chapitre (§ 2), la première question de recherche (*Quels éléments prendre en compte en conception pour évaluer d'une part la valorisabilité du produit, et d'autre part la pertinence de la valorisation envisagée sur les plans économique et environnemental ?*) a été étudiée à partir de l'analyse des méthodes et indicateurs d'évaluation de la valorisabilité d'un produit.

L'analyse des méthodes d'évaluation de la valorisabilité (c.-à-d. la performance du produit vis-à-vis de son traitement en fin de vie) a montré que 60 % utilisent la préservation de la masse comme l'un de ses critères (voir § 2.2.2.3). Parallèlement, l'analyse d'indicateurs d'évaluation de la valorisabilité a montré que sur l'ensemble des indicateurs identifiés dans toutes ces méthodes, 38 % correspondent à des taux de valorisabilité (voir § 2.2.3.1). L'importance de ce critère s'explique par le fait que la performance des filières de traitement en fin de vie est mesurée aujourd'hui par des critères techniques, et plus précisément par des indicateurs de préservation de la masse (taux de valorisation). Il existe donc un lien entre l'évaluation de la performance de la filière (performance réelle) et l'évaluation de la valorisabilité du produit (performance théorique).

L'analyse des méthodes d'évaluation de la valorisabilité a d'abord montré qu'un peu plus de la moitié (soit 53 %) sont multi-approche (voir § 2.2.3.1). Parmi ces méthodes, seules 13 % prennent en compte les trois approches, et aucune ne trouve le meilleur compromis entre les trois. Par ailleurs, cette étude a aussi montré que la majorité des méthodes (87 %) sont des évaluations multicritère (voir § 2.2.2.2).

Tel qu'évoqué dans la question de recherche, la pertinence économique et environnementale du traitement doit être validée. En effet, le concepteur imagine des scénarios de traitement en fin de vie pour le produit en cours de développement, mais il doit s'assurer que la voie de valorisation envisagée est aussi intéressante sur les plans économique et environnemental. Les indicateurs économiques identifiés s'intéressent ainsi aux valeurs économiques du traitement et de la matière. Par ailleurs, les indicateurs environnementaux évaluent la valeur environnementale du traitement en fin de vie, celle du contenu recyclé et la toxicité des substances utilisées.

Pour le concepteur, les dimensions économique et environnementale, deviennent finalement une dimension ou une performance technique de plus, ce qui est cohérent avec la vision de l'écoconception en prenant en

compte les aspects environnementaux dans les objectifs de performances et dans les critères de décisions.

Enfin, l'analyse des indicateurs d'évaluation de la valorisabilité a permis de constater que bien que la majorité utilisent des informations provenant de la phase de fin de vie (90 %), la plupart laissent la responsabilité de la définition du scénario de fin de vie à l'utilisateur de la méthode. Le problème de la délégation de ce choix est qu'il repose de fait sur les incertitudes induites d'un utilisateur à l'autre (éventuellement même au sein d'une même entreprise). Pour réduire ces incertitudes et rendre la démarche d'évaluation plus simple et fiable, l'idéal serait de disposer d'un outil permettant de faciliter la construction du meilleur scénario de fin de vie.

À partir des éléments présentés ci-dessus, il peut être conclu que l'évaluation de la valorisabilité doit non seulement être multi-approche mais aussi multicritère. Les trois approches ont été choisies à partir des besoins d'analyse identifiés lors des définitions d'une filière de traitement *performante* et de conception de produit *performante* vis-à-vis de son traitement en fin de vie. En revanche, les critères à prendre en compte pour évaluer la valorisabilité devront être définis. L'hypothèse de solution suivante est donc proposée :

Une évaluation de la valorisabilité du produit prenant en compte des critères techniques, économiques et environnementaux est nécessaire.

La deuxième partie de ce chapitre (§ 3) aborde la problématique de recherche suivante : *comment communiquer efficacement au concepteur les résultats de cette évaluation pour faciliter et améliorer sa prise de décision ?*

Dans ce cadre et lors d'une démarche d'écoconception ou de conception pour la fin de vie, il a été identifié que l'outil d'aide à la décision en conception le plus utilisé et le plus répandu consiste en des lignes directrices associées aux démarches de conception pour *X*.

Pour étudier plus amplement cet outil, un état de l'art des lignes directrices de conception pour la fin de vie a été réalisé. Parmi les travaux étudiés, *Engineering Design* (Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007) a été identifié comme la référence en conception, notamment en ce qui concerne les guidelines. Cependant, les thématiques concernant la conception pour la fin de vie et la conception pour l'environnement ne sont pas suffisamment abordées. L'ouvrage *Design for Environmental Sustainability* (Vezzoli et Manzini 2008) aborde la conception d'un point de vue environnemental et durable et propose un grand nombre de lignes directrices associées. La synthèse de lignes directrices réalisée par Go et al. (Go, Wahab, et Hishamuddin 2015) est une autre étude qui aborde amplement les thématiques qui nous intéressent. Il est centré sur la conception pour plusieurs cycles de vie et propose une synthèse vaste et complète. Cependant, le regroupement proposé n'est pas satisfaisant pour notre étude car les lignes directrices associées à chaque voie de valorisation ne sont pas clairement identifiées. Les autres études considérées ne sont enfin pas aussi exhaustives, ni aussi complètes que ces trois-là.

Un total de 381 lignes directrices (issues de 11 études) ont donc été identifiées, regroupées et classées selon la voie de valorisation visée (valorisation fonctionnelle, matière et énergétique, élimination) (§ 3.1.1). De plus, les lignes directrices associées aux seuls aspects environnementaux ainsi que les contraintes réglementaires ont été identifiées (voir respectivement § 3.1.2 et § 3.1.3).

L'identification des lignes directrices associées à une démarche d'écoconception pour la fin de vie nous a permis de retenir 33 leviers d'action (c.-à-d. les éléments sur quoi le concepteur peut agir). De plus, l'analyse des contraintes réglementaires a permis d'identifier trois éléments de validation.

Aujourd'hui le concepteur utilise l'évaluation de la valorisabilité du produit pour savoir vers quoi les efforts

de conception doivent être orientés. C'est pourquoi une étude évaluant l'adéquation entre ces deux éléments a été réalisée (§ 3.2) ; elle a permis de vérifier s'il y avait aussi des indicateurs permettant d'évaluer les leviers d'action identifiés parmi les indicateurs de valorisabilité.

Pour faciliter la prise de décision, il a été jugé nécessaire de savoir si les caractéristiques du produit que l'on souhaite modifier (en utilisant ces leviers) sont performantes par rapport à un objectif ou une référence. Cependant, l'étude a permis de montrer que bien qu'une bonne adéquation existe entre les indicateurs de valorisabilité et les éléments de validation des contraintes réglementaires, il y en a très peu (voir aucune) avec les leviers d'action.

À partir des éléments présentés ci-dessus et développés plus amplement tout au long du paragraphe 3.2, il peut être conclu qu'un lien entre les résultats issus de l'évaluation de la valorisabilité du produit et les lignes directrices d'écoconception semble nécessaire. Les concepteurs utilisant ces méthodes se trouvent en effet souvent démunis face à un ensemble de résultats et d'informations difficiles à interpréter. L'hypothèse de solution suivante est donc proposée :

Les résultats doivent être présentés sous la forme de lignes directrices de conception (telles que celles utilisées dans toute démarche de conception pour X). L'outillage des lignes directrices de conception avec les indicateurs d'évaluation de la valorisabilité permettra de créer un lien entre les méthodes d'évaluation et d'aide à la décision en conception.

À partir des constats issus des deux hypothèses de solutions formulées, on note qu'une méthode d'aide à la décision en conception basée sur l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit permettrait aux concepteurs de mieux connaître les opportunités et contraintes induites par les filières en charge de son traitement en fin de vie. De plus, l'outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie simplifierait et améliorerait leurs choix de conception et fournirait aux acteurs des filières les informations pertinentes permettant une meilleure valorisation de leur produit.

Pour répondre à la problématique « comment créer un lien direct et bijectif entre le concepteur d'un produit et les acteurs de la filière en charge de son traitement en fin de vie ? Comment pérenniser cet échange d'informations entre acteurs ? », L'hypothèse de solution globale peut enfin être formulée :

La mise en place d'une méthode d'aide à la décision en conception basée sur l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit et l'outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie peut servir à établir une synergie entre l'équipe de conception du produit et les acteurs de la filière.

Une figure synthétisant les trois hypothèses de solution formulées est présentée à la figure 43.

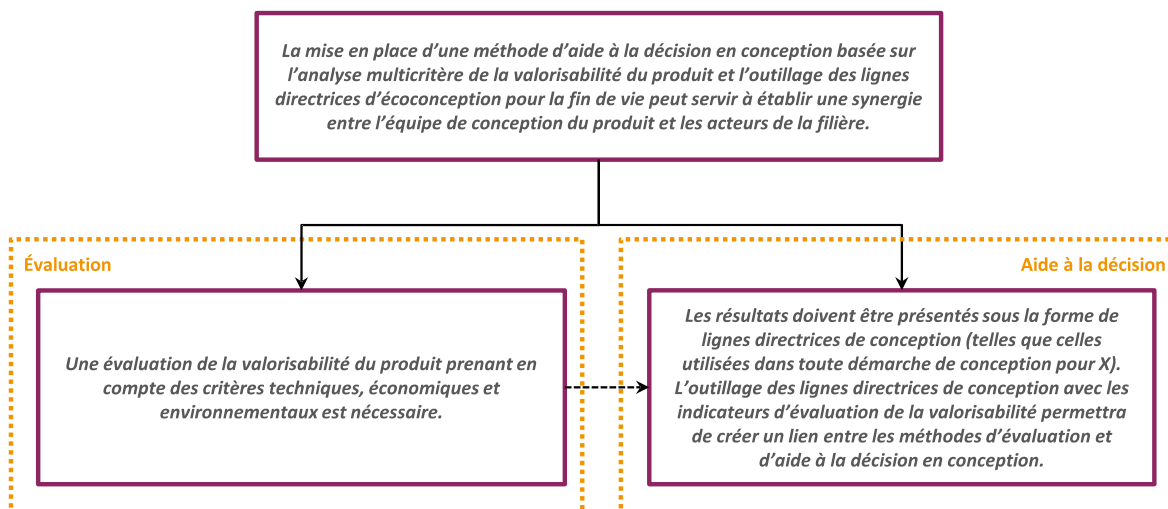


Figure 43. Hypothèses de solution

Chapitre 4

Méthodologie d'évaluation et d'aide à la décision en conception

Résumé Ce chapitre développe l'hypothèse de solution définie précédemment:

La mise en place d'une méthode d'aide à la décision en conception basée sur l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit et l'outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie peut servir à établir une synergie entre l'équipe de conception du produit et les acteurs de la filière.

Un outil de *conception pour la fin de vie* est proposé. Il cherche à créer le lien pour que le concepteur puisse mieux interpréter les résultats et informations auxquels il est confronté, et simplifier d'autant son processus de conception.

La démarche se décompose en trois étapes classiques dans ce type d'approches : (i) évaluation de la valorisabilité du produit, (ii) aide à la décision en conception et (iii) reconception du produit. La capacité d'un produit à être valorisé par la filière de traitement en fin de vie ainsi que la pertinence économique et environnementale du traitement sont ainsi évalués dans un premier temps. Cette évaluation permet d'identifier les composants ou les constituants les moins valorisables. La performance des caractéristiques des composants identifiés est ensuite évalué par rapport à un objectif ou à une référence. Enfin, des stratégies d'améliorations adaptées sont proposées pour les caractéristiques identifiées comme non performantes.

En complément, un outil de *conception depuis la fin de vie* est proposé. Il permet de vérifier la viabilité d'utilisation de la matière recyclée sur les plans technique, économique et environnementale. L'outil vise à simplifier le processus de choix des matériaux en conception et à encourager ainsi l'utilisation de la matière recyclée et à favoriser l'économie circulaire.

La mise en oeuvre des deux outils proposés cherche à créer une bijectivité des échanges entre les concepteurs et les acteurs de la filière de traitement.

Table des matières du Chapitre 4

1. Introduction. Pilotage de la circularité par les acteurs de la conception et de la fin de vie	177
2. <i>Design for EoL</i>. Développement d'un outil d'aide à la décision en conception piloté par l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit et l'outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie	178
2.1. Description de la démarche	178
2.2. Étape 1. Évaluation de la valorisabilité en fin de vie du produit en cours de conception	179
2.2.1. Description de la méthode d'évaluation de la valorisabilité.....	179
2.2.2. Indicateur et indice. Rappel sémantique	180
2.2.3. Construction de l'indice de valorisabilité.....	180
2.2.4. Sélection des indicateurs de valorisabilité.....	180
2.2.4.1. Évaluation de la performance technique du traitement du produit	180
2.2.4.2. Évaluation de la pertinence économique du traitement du produit	186
2.2.4.3. Évaluation de la pertinence environnementale du traitement du produit.....	189
2.2.5. Sélection de la méthode de pondération des indicateurs	192
2.2.6. Sélection de la méthode d'agrégation des indicateurs	193
2.2.7. Proposition d'indice de valorisabilité d'un produit	195
2.3. Étape 2. Aide à la décision en conception	196
2.3.1. Description de la méthode d'aide à la décision en conception	196
2.3.2. Outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie	197
2.3.2.1. Description de la démarche d'outillage.....	197
2.3.2.2. Définition d'indicateurs associés aux leviers d'action de choix de conception et mise en correspondance avec les lignes directrices	197
2.3.2.3. Définition d'indicateurs associés aux leviers d'action de transmission d'informations et mise en correspondance avec les lignes directrices	229
2.4. Étape 3. Réconception du produit	231
3. <i>Design from EoL</i>. Développement d'un outil d'aide à la décision en conception piloté par l'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée	232
3.1. Description de la méthode d'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée	232
3.2. Construction de l'indice de viabilité d'utilisation de la matière recyclée	233
3.2.1. Sélection des indicateurs d'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée	233
3.2.1.1. Évaluation de la pertinence technique de l'utilisation de la matière recyclée	233
3.2.1.2. Évaluation de la pertinence économique de l'utilisation de la matière recyclée	234
3.2.1.3. Évaluation de la pertinence environnementale de l'utilisation de la matière recyclée	234
3.2.2. Sélection de la méthode de pondération	235
3.2.3. Sélection de la méthode d'agrégation	235
4. Synthèse.....	236

Méthodologie d'évaluation et d'aide à la décision en conception

1. Introduction.

Pilotage de la circularité par les acteurs de la conception et de la fin de vie

Les phases de conception et de fin de vie doivent être en interaction, en synergie, pour assurer la circularité des composants ou des matériaux. La conception doit prendre en compte ce couplage en œuvrant *pour* et *à partir* de la fin de vie. Le corollaire est que les acteurs de la fin de vie de produit doivent faire évoluer leurs positions et pratiques pour travailler *à partir* et *pour* la conception. Ceci crée des relations entre flux physiques (produits, pièces, matière), information (données, quantité, qualité) et économiques (valeur monétaire des ressources ou des matières premières secondaires). Ces quatre types de relations sont détaillés ci-dessous et schématisés à la figure 44 :

- la *conception pour la fin de vie (Design for EoL³³)* vise à améliorer le produit pour qu'il soit valorisé au mieux lorsqu'il sera intégré par sa filière de traitement en fin de vie, et favoriser ainsi l'élimination des résidus qui ne pourraient être valorisés ;
- la *conception depuis la fin de vie (Design from EoL)* s'intéresse à l'intégration dans un nouveau produit des artefacts issus de la filière de traitement en fin de vie (p. ex. utilisation de la matière recyclée au lieu de la matière vierge, la réaffectation d'un module ou d'une pièce extraits lors d'un démontage, etc.) ;
- la *fin de vie depuis la conception (EoL from design)* a pour objectif d'intégrer les informations ou les éléments développés en conception de produit dans le mode de fonctionnement de la filière ou ses procédés de traitement pour accroître d'abord la valorisation fonctionnelle, puis matière, voire enfin énergétique ;
- la *fin de vie pour la conception (EoL for design)* représente la filière de traitement en fin de vie qui devient un fournisseur d'artefacts (c.-à-d. produit, module, pièce ou matière issus d'une voie de valorisation) adapté au cahier de charges du concepteur.

³³ EoL : end of life

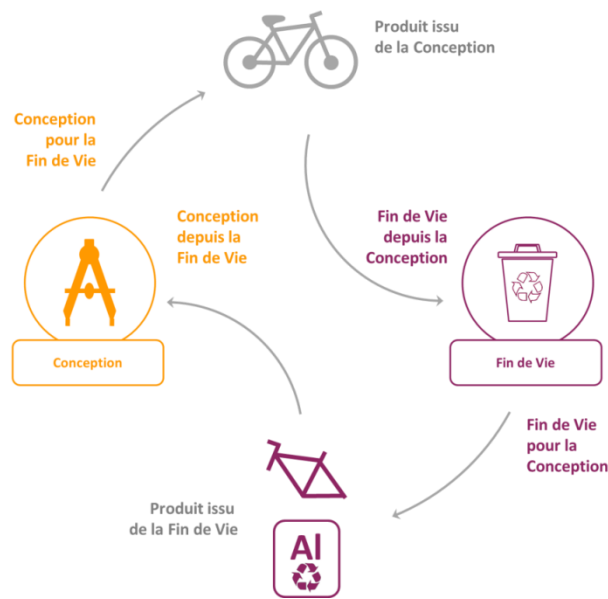


Figure 44. Liens et échanges entre la conception et la fin de vie.

Le travail de thèse est centré sur le concepteur et sur les échanges qu'il entretient avec les acteurs de la filière de traitement en fin de vie. C'est pourquoi l'étude se centre sur la « conception *pour* » et la « conception *depuis* la fin de vie ». Cependant, il ne faut oublier ni l'existence, ni l'importance des deux autres liens.

Ce chapitre présente donc dans un premier temps les démarches et outils de conception pour la fin de vie développés (§ 2), puis de conception depuis la fin de vie (§ 3).

2. Design for EoL.

Développement d'un outil d'aide à la décision en conception piloté par l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit et l'outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie

La première contribution de la thèse est un outil d'aide à la décision en conception qui s'inscrit dans le cadre d'une démarche de conception *pour* la fin de vie. L'outil est introduit dans ce paragraphe ; la démarche globale est d'abord présentée (voir § 2.1) et chaque étape est ensuite détaillée (§ 2.2 à § 2.4).

2.1. Description de la démarche

L'objectif de cet outil est de faire le lien entre l'évaluation de la valorisabilité d'un produit et les lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie. En d'autres termes, il vise à traduire les informations issues de l'évaluation des actions et recommandations facilement compréhensibles par le concepteur. Le synoptique de la démarche est détaillé à la figure 45.

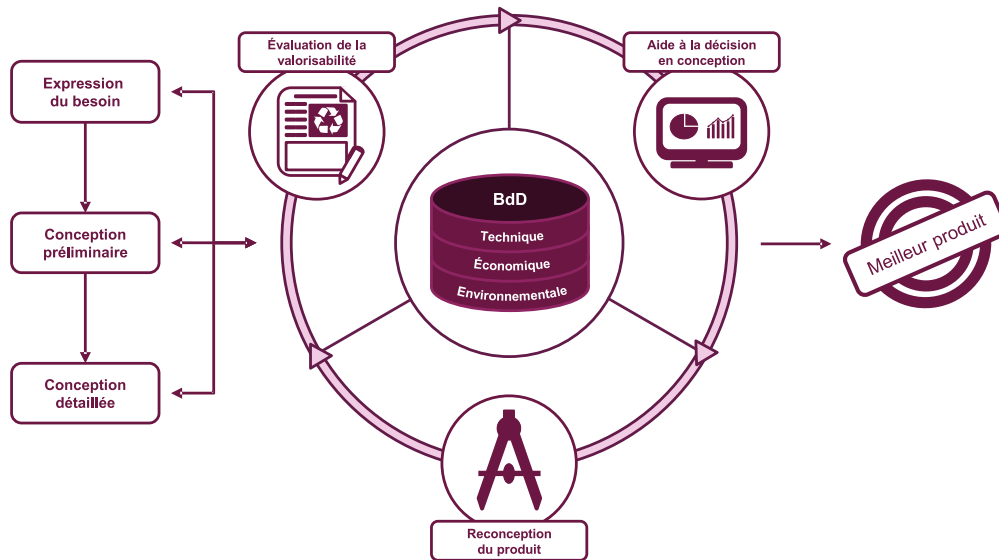


Figure 45. Synoptique de la démarche d'aide à la décision proposée

Cette démarche peut être utilisée à différents moments du cycle de développement du produit (voir Chapitre 1, § 3.2). Elle se décompose en trois étapes :

- **Étape 1. Évaluation de la valorisabilité du produit** Elle vise à analyser la capacité d'un produit à être valorisé par la filière de traitement lorsqu'il sera en fin de vie, et à évaluer la pertinence économique et environnementale de ce traitement. Une fois le produit reconçu, cette étape sert aussi à valider les objectifs d'amélioration. Ce processus est itératif et prend fin lorsque le produit satisfait les critères ;
- **Étape 2. Aide à la décision en conception** L'objectif est d'identifier d'abord les composants ou les constituants les moins valorisables, d'évaluer ensuite la performance des caractéristiques des artéfacts retenus par rapport à un objectif ou une référence, et de proposer enfin les stratégies d'amélioration les plus adaptées ;
- **Étape 3. Reconception du produit** Le concepteur reconçoit le produit en suivant les lignes directrices proposées dans l'étape précédente.

2.2. Étape 1.

Évaluation de la valorisabilité en fin de vie du produit en cours de conception

2.2.1. Description de la méthode d'évaluation de la valorisabilité

Dans le Chapitre 2 (§ 3.2.2.1), nous avons défini la valorisabilité comme *la capacité conjointe du produit en fin de vie et de la filière de traitement associée à recouvrer les propriétés techniques et la valeur économique du produit complet, de ses composants et/ou de ses matériaux constitutifs. Les opérations de valorisation fonctionnelle d'abord, matière ensuite et énergétique enfin (dont la pertinence environnementale doit être validée pour chacune) suivent donc une logique d'échelle et de hiérarchisation.*

À partir de cette définition on observe bien que la valorisabilité doit être évaluée suivant les trois dimensions technique, économique et environnementale. Il convient de bien noter que la dimension technique porte sur la *performance* technique du traitement du produit, et les deux autres sur l'évaluation de la *pertinence* économique et environnementale du traitement.

Une évaluation multidimensionnelle implique que le concepteur soit confronté à la prise de décision multicritère, tâche complexe s'il en est. En effet, cela implique le choix de la meilleure solution satisfaisant plusieurs critères ou caractéristiques pouvant être très concrets, mais aussi se révéler très vagues (« Multi-Criteria Decision Making - an overview | ScienceDirect Topics » s. d.). L'utilisation d'un *indice* (global) pour synthétiser un ensemble d'attributs peut en général simplifier le processus de prise de décision (Ardente, Beccali, et Cellura 2003). C'est pourquoi un indice de valorisabilité du produit, s'appuyant sur les trois dimensions (technique, économique et environnementale) sera proposé dans le cadre de notre démarche.

2.2.2. Indicateur et indice.

Rappel sémantique

Il est important dans un préliminaire de rappeler la nuance sémantique entre un *indicateur* et un *indice*.

Un *indicateur* est un outil d'évaluation d'un état ou d'une évolution. Cette notion sous-entend donc une relation causale entre la grandeur mesurée (autrement dit, *indiquée*) et l'indicateur. Il exprime ainsi une synthèse d'informations de natures potentiellement différentes, et offre alors une possibilité de dialogue entre différents acteurs (spécialistes des matériaux, du recyclage, etc.).

L'*indice* désigne un indicateur construit par agrégation de plusieurs indicateurs. L'expression *indice global* (pourtant fréquemment utilisée) est donc un pléonasme.

2.2.3. Construction de l'indice de valorisabilité

La construction d'un tel indice implique plusieurs étapes dont les principales comprennent la sélection des indicateurs appropriés, leur pondération et leur agrégation (Gan et al. 2017). Dans cette partie, nous allons aborder les étapes conduisant à la construction de l'indice de valorisabilité (voir § 2.2.4 à 2.2.6), puis présenter l'indice proposé (§ 2.2.7).

2.2.4. Sélection des indicateurs de valorisabilité

La sélection des indicateurs de valorisabilité est menée en trois étapes. Ceux permettant d'évaluer la performance technique du traitement sont d'abord définis (§ 2.2.4.1). Les indicateurs d'évaluation des pertinences économique et environnementale du traitement seront abordés ensuite (§ 2.2.4.2 et 2.2.4.3).

2.2.4.1. Évaluation de la performance technique du traitement du produit

Il a été mis en évidence dans le chapitre précédent (voir tableau 19) que la dimension technique de la valorisabilité est évaluée principalement selon cinq approches dans la littérature : la préservation de la masse, la préservation de la qualité (des propriétés), la recyclabilité (du produit) et le contenu de la matière recyclée. La figure 46 en propose un schéma de synthèse.

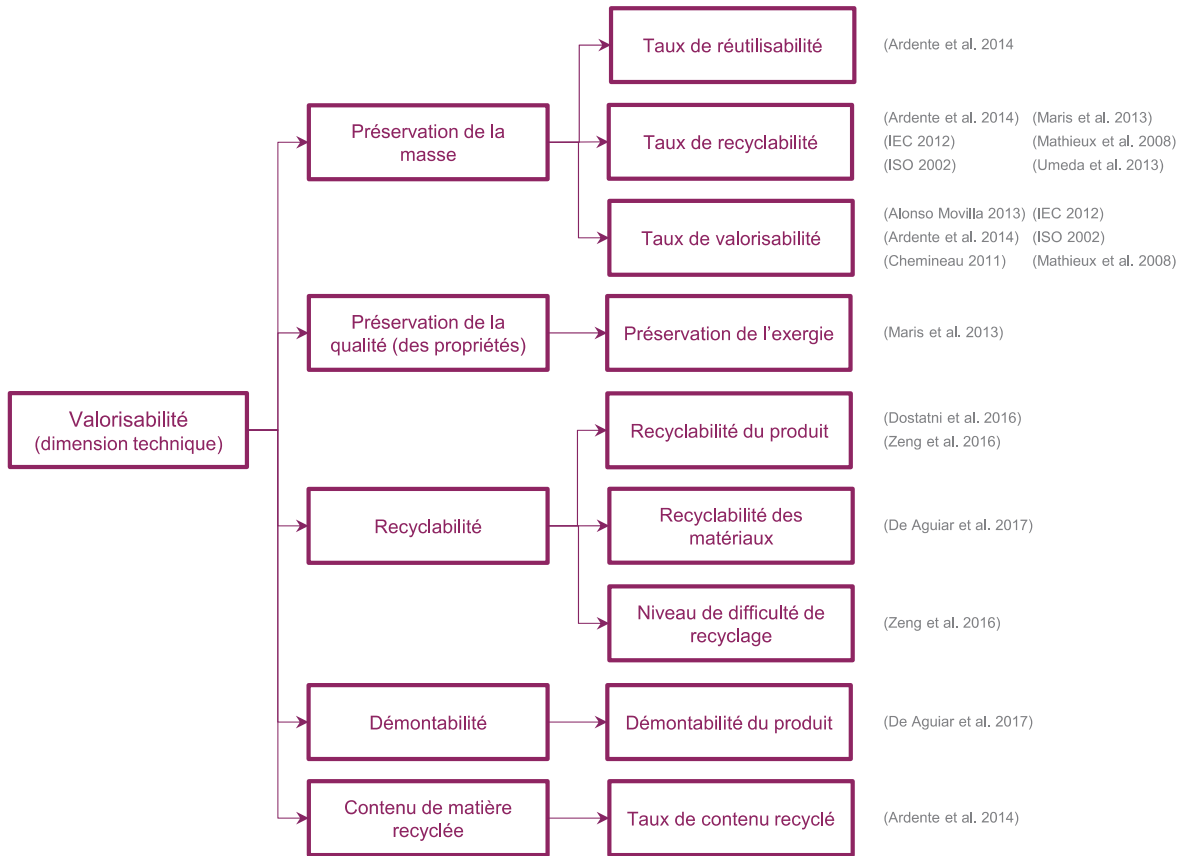


Figure 46. Évaluation de la performance technique du traitement dans la littérature

Il a également été défini au Chapitre 2 (§ 3.1.2.1) que la performance peut être vue comme la relation ternaire entre les objectifs visés, les moyens mis en œuvre et les résultats obtenus. En s'appuyant sur ce triptyque, Gibert définit la performance avec trois indicateurs : efficacité, efficacité et pertinence (Gibert 1980). Dans le cadre de notre étude, le ou les indicateurs de performance technique du traitement du produit doivent donc être construits sous la forme de rapports et pouvoir être associés à l'un des trois indicateurs de la performance.

De plus, il a été rappelé dans le Chapitre 2 (§ 4.1) que la dimension technique doit évaluer la fraction massique valorisée par chacune des voies d'une part, et le degré de préservation de la valeur technique d'autre part (c.-à-d. évaluer si les propriétés techniques du produit complet, de ses composants et/ou de ses matériaux constitutifs ont été bien recouvrées).

2.2.4.1.1. Comparaison d'indicateurs

La figure 46 montre que parmi les indicateurs de valorisabilité identifiés, seuls ceux basés sur la préservation de la masse et sur la préservation de la qualité (des propriétés) correspondent à nos besoins d'analyse.

Les indicateurs de valorisabilité évaluant la préservation de la masse trouvés dans la littérature (voir Chapitre 3, tableau 19) ont été comparés. La synthèse de cette étude comparative est présentée au tableau 28.

		Taux de réutilisabilité (Ardente et al. 2014)	Taux de recyclabilité (Ardente et al. 2014)	Taux de recyclabilité (IEC 2012)	Taux de recyclabilité (ISO 2002)	Préservation de la masse (Maris et al. 2013)	Valorisation massique (recyclage) (Matthieux et al. 2008)	Taux de recyclabilité (Umeda et al. 2013)	Taux de valorisation théorique (Alonso Movilla et al. 2013)	Taux de valorisation pratique (Alonso Movilla et al. 2013)	Taux de valorisation affecté (Alonso Movilla et al. 2013)	Taux de valorisabilité (Ardente et al. 2014)	Taux massique potentiel de valorisation (Chemineau 2011)	Taux de valorisabilité (IEC 2012)	Taux de valorisabilité (ISO 2002)	Valorisation massique (valorisation) (Matthieux et al. 2008)
Données pris en compte	Masse du produit et/ou de ses composants	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	Masse réutilisable	•		•	•	•			•	•	•	•	•	•	•	
	Masse valorisable fonctionnellement (hors réutilisation)															
	Masse recyclable		•	•	•	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•
	Masse valorisable en matière (hors recyclage)															
	Masse valorisable énergétiquement							•	•	•	•	•	•	•	•	•
Masse qui n'est pas valorisable							•								•	
Prise en compte de la performance de la filière	Taux de valorisation issu de la filière	•	•	•				•		•	•			•	•	
	Autre					•	•				•					•
	Non précisé												•			
	Pas de prise en compte de la performance de la filière				•				•						•	

Tableau 28. Comparaison d'indicateurs de préservation de la masse utilisés dans les méthodes d'évaluation de la valorisabilité du produit.

Les taux de valorisabilité offrent une vision globale de la façon dont la masse est distribuée parmi les différentes voies de valorisation en fin de vie. Cependant, ces indicateurs ne permettent de vérifier ni le niveau d'efficacité de chaque voie de valorisation, ni le respect de la hiérarchie de traitement des déchets imposée par la Directive 2008/98/CE (Parlement Européen et Conseil de l'Union Européenne 2008). En outre, contrairement aux apparences, ces taux ne sont pas des indicateurs de performance car ils ne correspondent pas au cadre des indicateurs définis par Gibert (c.-à-d. efficacité, efficience et pertinence (Gibert 1980)).

Nous n'avons trouvé aucun des indicateurs de la littérature qui réponde directement à nos besoins. Cependant, l'évaluation de la préservation de la masse est un critère d'analyse incontournable car les objectifs réglementaires sont définis à partir de ces taux de valorisation. Il a donc été décidé de garder les indicateurs de taux de valorisabilité : ils permettent non seulement de vérifier, dès la conception, si le produit peut potentiellement respecter les objectifs de valorisation imposés par la législation, mais ils offrent aussi une vision globale sur le traitement.

Parmi ces indicateurs, les taux de réutilisabilité, recyclabilité et valorisabilité proposés par la méthode REAPro (Ardente et Mathieux 2014) paraissent les plus pertinents ; non seulement ils pondèrent les masses de chaque composant du produit par les taux réels de valorisation de la filière de traitement associée, mais la méthode découple aussi la réutilisabilité de la recyclabilité. (C'est important pour notre étude car ce sont des voies de valorisation différentes.) Enfin, la structure des indicateurs proposée est conforme aux formules de l'IEC/TR 62635 qui est l'une des deux méthodes de référence.

D'autres indicateurs devront cependant être proposés pour mieux répondre aux exigences d'analyse évoqués précédemment.

Les indicateurs de préservation de la masse permettent d'identifier comment les fractions de masse du produit ont été distribuées dans les différentes voies de traitement. Cependant, ils ne permettent pas d'évaluer si les propriétés de techniques du produit complet, de ses composants et/ou de ses matériaux constitutifs ont été bien recouvrées.

Dans ce cadre, Maris *et al.* sont les seuls à prendre en compte ce critère dans leur méthode d'évaluation de la valorisabilité (Maris et Froelich 2013). Ils se focalisent sur la préservation de la qualité des propriétés des matériaux recyclés et proposent d'utiliser un indicateur de préservation de l'exergie. Il est construit comme le rapport entre l'exergie de la matière recyclée (calculé à partir des pertes d'exergie lors du traitement) et celle de la matière vierge. Cet indicateur n'a toutefois pas été retenu car on a considéré que le concepteur n'aurait pas à disposition ce type des données.

Un nouvel indicateur permettant d'évaluer la préservation de la qualité doit être proposé.

2.2.4.1.2. Indicateurs retenus et proposés

Tel qu'indiqué précédemment, notre analyse se base sur les taux de valorisabilité proposés par la méthode REAPro (Ardente et Mathieux 2014). Néanmoins pour élargir ces indicateurs à toutes les voies de traitement et non uniquement aux voies habituelles, nous redéfinissons les taux de valorisabilité fonctionnelle, matière et énergétique comme suit :

$$\tau'_v = \frac{m_v}{m_p} \quad \text{où } m_v = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m m_c^i \tau_v^{i,j}$$

avec

i : numéro de l'artéfact ($1 \leq i \leq m$)

j : numéro de la voie de valorisation ($1 \leq j \leq n$)

m : nombre d'artéfacts du produit

m_c^i : masse du $i^{\text{ème}}$ artéfact

m_p : masse totale du produit

m_v : masse potentiellement valorisable fonctionnellement/en matière/énergétiquement

n : nombre de voies de traitement en valorisation fonctionnelle/matière/énergétique

$\tau_v^{i,j}$: taux de valorisation fonctionnelle/matière/énergétique du $i^{\text{ème}}$ artéfact dans la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement

τ'_v : taux de valorisabilité fonctionnelle/matière/énergétique

Cet indicateur sert à calculer le taux de valorisabilité d'une voie de valorisation spécifique (fonctionnelle, matière ou énergétique). Le taux de valorisabilité total est calculé comme la somme des trois taux de valorisabilité.

Par ailleurs, l'indicateur de performance technique du traitement d'un artéfact est proposé. Contrairement aux indicateurs identifiés dans la littérature, cet indicateur a été construit autour de la notion de fraction non valorisée par voie de valorisation (et non plus de la fraction valorisée). Ce choix est guidé par la nécessité d'obtenir une forme de résultats plus facile à utiliser par la suite. Il est ainsi défini par :

$$p_{te}^{i,j} = 2 - \varepsilon_v^{i,j}$$

avec

$p_{te}^{i,j}$: performance technique du traitement du $i^{\text{ème}}$ artéfact dans la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement

$\mathcal{E}_V^{i,j}$: efficacité potentielle de la valorisation fonctionnelle/matière/énergétique du $i^{\text{ème}}$ artéfact dans la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement

Un exemple de la forme de résultat attendue pour les performances techniques du traitement des artéfacts est présenté dans la figure 47.

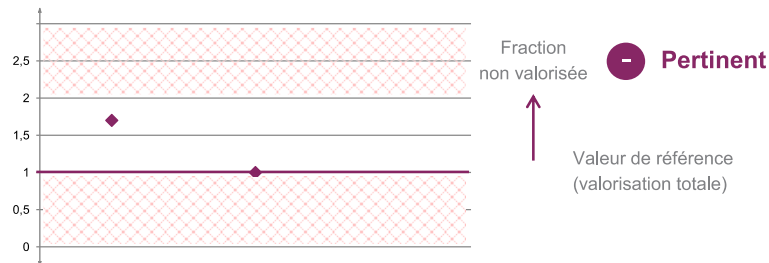


Figure 47. Forme du résultat de l'indicateur de performance technique du traitement proposé

Les taux d'efficacité potentielle de valorisation utilisés dans le calcul de la performance technique du traitement d'un artéfact sont détaillés ci-dessous.

Les résultats de performance technique du traitement des artéfacts, dont la valeur de référence est égale à 1, s'échelonnent entre 1 et 2 (voir figure 47). Ainsi, une performance égale à 1 implique qu'il n'y a pas de fraction non valorisée et que le traitement a donc été parfait (pas de pertes). En revanche, plus la valeur de l'indicateur augmente et s'éloigne de la valeur de référence, moins le traitement est performant techniquement (la fraction non valorisée augmentant).

Cette forme de résultat a été définie dans le but de pouvoir agréger les trois dimensions (§ 2.2.7). Elle intègre ainsi les contraintes permettant de rendre l'indicateur technique compatible avec l'indicateur économique (§ 2.2.4.2.2) et l'indicateur environnemental (§ 2.2.4.3.2).

L'indicateur d'efficacité potentielle de la valorisation fonctionnelle évalue la performance théorique de l'ensemble d'opérations visant à préserver la valeur fonctionnelle (p. ex. reconditionnement et montée en gamme). Il est calculé de la même façon que le taux de valorisabilité fonctionnelle :

$$\mathcal{E}_{vf}^i = \frac{m_{vf}^i}{m_c^i} \quad \text{où } m_{vf}^i = \sum_{j=1}^n m_c^i \tau_{vf}^{i,j}$$

avec

m_{vf}^i : masse du $i^{\text{ème}}$ artéfact potentiellement valorisable fonctionnellement

n : nombre de voies de traitement en valorisation fonctionnelle

\mathcal{E}_{vf}^i : efficacité potentielle de la valorisation fonctionnelle du $i^{\text{ème}}$ artéfact

$\tau_{vf}^{i,j}$: taux de valorisation du $i^{\text{ème}}$ artéfact dans la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement de la valorisation fonctionnelle

L'indicateur d'efficacité potentielle de la valorisation matière évalue la performance théorique de l'ensemble des opérations servant à préserver la valeur de la matière (p. ex. recyclage et fabrication de combustibles solides de récupération). La part du produit considérée comme fonctionnellement valorisable est donc exclue

du calcul. L'indicateur est :

$$\mathcal{E}_{vm}^i = \frac{m_{vm}^i}{m_c^i - m_{vf}^i} \quad \text{où } m_{vm}^i = \sum_{j=1}^n m_c^i \tau_{vm}^{i,j} \tau_p^{i,j}$$

avec

- m_{vm}^i : masse du $i^{\text{ème}}$ artéfact potentiellement valorisable en matière
- n : nombre de voies de traitement en valorisation matière
- \mathcal{E}_{vm}^i : efficacité potentielle de la valorisation matière du $i^{\text{ème}}$ artéfact
- $\tau_p^{i,j}$: taux de pureté du $i^{\text{ème}}$ artéfact dans la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement de la valorisation matière
- $\tau_{vm}^{i,j}$: taux de valorisation du $i^{\text{ème}}$ artéfact dans la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement de la valorisation matière

La prise en compte d'un facteur de pureté peut être notée dans l'équation précédente. Son but est de prendre en compte la préservation de la qualité des matériaux recyclés. Notons que cette notion n'est utilisée que pour la valorisation *matière*. En effet lors de la valorisation fonctionnelle, les artéfacts valorisés doivent assurer un niveau de qualité au moins égal à celui d'un artéfact équivalent neuf, autrement dit garantir qu'il n'y a pas de perte de qualité. Par ailleurs lors de la valorisation énergétique et l'élimination, les propriétés techniques du produit ne sont pas recouvrées : la valeur récupérée est seulement énergétique pour la première, et nulle pour la seconde.

L'indicateur d'efficacité potentielle de la valorisation énergétique évalue la performance théorique de l'ensemble d'opérations ayant pour objectif la préservation de la valeur à partir d'une valorisation énergétique (c.-à-d. incinération des déchets pour produire de l'énergie thermique et électrique). Comme l'indicateur précédent, celui-ci ne prend pas en compte les fractions considérées comme mieux valorisables (valorisations fonctionnelle et matière). L'indicateur s'exprime ainsi comme :

$$\mathcal{E}_{ve}^i = \frac{m_{ve}^i}{m_c^i - (m_{vf}^i + m_{vm}^i)} \quad \text{où } m_{ve}^i = \sum_{j=1}^n m_c^i \tau_{ve}^{i,j}$$

avec

- m_{ve}^i : masse du $i^{\text{ème}}$ artéfact potentiellement valorisable énergétiquement
- n : nombre de voies de traitement en valorisation énergétique
- \mathcal{E}_{ve}^i : efficacité potentielle de la valorisation énergétique du $i^{\text{ème}}$ artéfact
- $\tau_{ve}^{i,j}$: taux de valorisation du $i^{\text{ème}}$ artéfact dans la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement de la valorisation énergétique

L'intérêt des indicateurs d'efficacité que nous proposons réside dans le fait qu'ils suivent la logique de la hiérarchie de valorisation (telle que celle définie par la Directive 2008/98/CE). Ainsi dans un premier temps, on cherche à évaluer l'efficacité de la préservation de la valeur fonctionnelle (totale ou partielle) du produit, puis sa valeur matière et enfin seulement sa valeur énergétique. De plus, nous retenons ici des indicateurs d'efficacité cohérents avec la définition de Gibert qui compare résultats et objectifs (voir Chapitre 2, § 3.1.2.1). Les résultats correspondent ici à la masse potentiellement valorisable, et l'objectif à la masse à valoriser dans chaque voie (de plus en plus faible, au fur et à mesure de la descente dans la hiérarchie des déchets).

2.2.4.2. Évaluation de la pertinence économique du traitement du produit

La dimension économique de la valorisabilité est évaluée principalement selon deux approches dans la littérature (voir Chapitre 3, tableau 19) : la valeur économique du traitement d'une part, et la valeur économique de la matière d'autre part. La figure 48 en propose une synthèse.

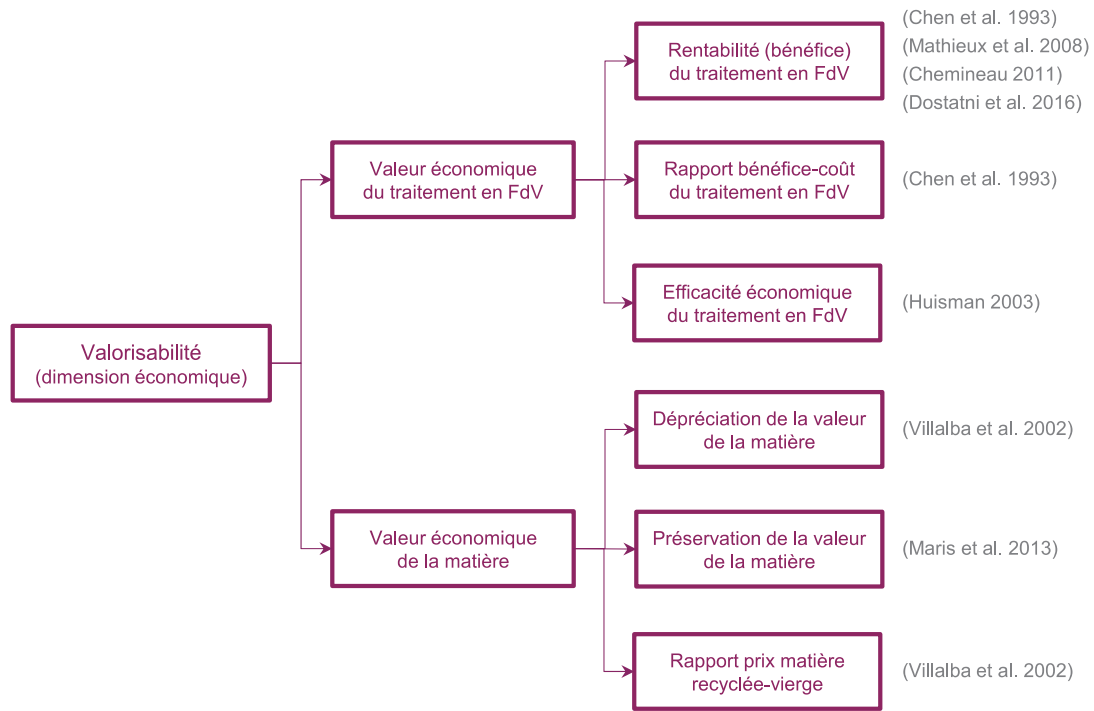


Figure 48. Évaluation de la dimension économique de la valorisabilité dans la littérature

Dans notre approche, on considère que la dimension économique de la valorisabilité doit évaluer la pertinence économique du traitement en fin de vie. Cette partie a pour but de comparer les indicateurs identifiés dans la littérature, d'en choisir un s'il correspond à nos besoins, ou à défaut d'en proposer un nouveau le cas échéant.

2.2.4.2.1. Comparaison d'indicateurs

À partir de la définition de valorisabilité (voir Chapitre 2, § 3.2.2.1), nous constatons que la pertinence économique du traitement en fin de vie vise à évaluer si le traitement en fin de vie a permis de recouvrir la valeur économique du produit complet, de ses composants et/ou des ses matériaux constitutifs. L'indicateur à utiliser doit donc confronter les données économiques issues de la fin de vie (p. ex. le bénéfice de la matière recyclée) aux données de la phase de vie du produit (p. ex. prix du produit ou des matériaux). De plus, une telle comparaison doit s'exprimer sous la forme d'un rapport. En effet, une fraction de deux grandeurs de même nature permettrait de mieux visualiser leur relation, faciliter ainsi l'interprétation de l'indicateur, et donc enfin la prise de décision en conception.

Les indicateurs trouvés dans la littérature sont comparés dans le tableau 29 pour identifier ceux répondant aux besoins listés ci-dessus.

		Efficacité économique (Huisman. 2003)	Bénéfice net du recyclage (Chen et al. 1993)	Rentabilité potentielle (Chemineau 2011)	Valorisabilité économique (Mathieux et al. 2008)	Coût de recyclage (Dostatni et al. 2016)	Rapport bénéfice-coût de recyclage (Chen et al. 1993)	Dépréciation (Villalba et al. 2002)	Préservation de la valeur économique (Maris et al. 2013)	Indice de recyclage (Villalba et al. 2002)
Données FdV du produit	Coût des déchets (produit, composants ou matière)							•		
	Coût de traitement en fin de vie	•	•	•	•	•	•			
	Bénéfice associé aux composants réutilisables issus du traitement		•	•	•		•			
	Bénéfice associé à la matière recyclée issue du traitement	•	•	•	•		•		•	•
	Bénéfice (autre)		•		•		•			
Grade de la matière	•									
Données vie du produit	Coût d'extraction et de production des matières premières	•								
	Prix de la matière vierge	•						•	•	•
	Coût de fabrication									
	Prix du produit ou composant									

Tableau 29. Comparaison d'indicateurs économiques utilisés dans les méthodes d'évaluation de la valorisabilité du produit.

L'indicateur d'efficacité économique de Huisman utilise bien des données issues des phases de vie et de fin de vie du produit. Cependant, il n'est pas utile pour notre méthode d'évaluation car la valeur économique de la matière recyclée n'est pas confrontée à la valeur de la matière vierge sous forme de rapport (comme souhaité), mais dans une forme normalisée comparant le meilleur et le pire scénario économique.

Les cinq indicateurs suivants ne correspondent pas non plus à nos besoins car ils utilisent uniquement les données économiques issues de la fin de vie, sans les confronter aux données économiques du produit (c.-à-d. à la valeur économique du produit, des composants ou des matières premières).

Les trois derniers indicateurs confrontent bien des données des deux phases et pourraient potentiellement être utiles dans notre méthode d'évaluation.

L'indicateur de dépréciation proposé par Villalba et al. évalue la perte de la valeur de la matière après utilisation du produit (c.-à-d. avant le traitement en fin de vie). Il ne correspond pas à nos besoins car nous nous intéressons à la valeur après traitement. La structure de l'indicateur confronte des données de vie et de fin de vie du produit sous forme de rapport ce qui semble toutefois intéressante.

L'indicateur proposé par Maris et Froelich s'intéresse bien à la préservation de la valeur économique. Cependant, cet indicateur est associé à ce que les auteurs appellent l'efficacité économique : sa valeur est définie à 1 si le prix de la matière recyclée est supérieur ou égal à 80 % du prix de la matière vierge, et à 0 s'il est inférieur. Il s'agit donc d'une quantité binaire qui n'est pas suffisante dans notre méthode d'évaluation car elle ne reflète pas la valeur préservée.

L'indice de recyclage proposé par Villalba et al. ne correspond pas non plus à nos besoins car il compare, sous forme de rapport, le prix de la matière recyclée au prix de la matière vierge et non la valeur recouvrée par rapport à la valeur initiale.

Aucun des indicateurs identifiés dans la littérature n'est donc pleinement satisfaisant. Cependant, un nouveau peut être construit à partir de préservation de la valeur économique de Maris et Froelich.

2.2.4.2.2. Indicateur de pertinence économique de traitement

L'indicateur de pertinence économique du traitement d'un artéfact a été construit sur la base de l'indicateur de préservation de la valeur économique de Maris et Froelich et de l'indicateur de performance technique défini dans le paragraphe précédent. De plus, le champ d'évaluation a été élargi pour évaluer la pertinence économique d'autres voies de traitement que le recyclage. La pertinence économique de traitement d'un artéfact est donc définie par :

$$\varepsilon_{v,ec}^j = \frac{v_{ecr}^j}{v_{ecp}} \quad \text{où } v_{ecr}^j = \sum_{i=1}^m m_v^{i,j} v_{ec}^{i,j}$$

avec

i : numéro de l'artéfact ($1 \leq i \leq m$)

j : numéro de la voie de valorisation ($1 \leq j \leq n$)

ε_{pvec}^j : efficacité potentielle de la préservation de la valeur économique de l'artéfact dans la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement

m : nombre d'artéfacts du produit

$m_v^{i,j}$: masse potentiellement valorisable fonctionnellement/en matière/ énergétiquement du $i^{\text{ème}}$ artéfact dans la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement

$v_{ec}^{i,j}$: valeur économique du $i^{\text{ème}}$ artéfact issu de la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement

v_{ecp} : valeur économique du produit

v_{ecr}^j : valeur économique récupérée dans la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement

Pour répondre à nos besoins d'analyse, l'indicateur de pertinence économique du traitement d'un artéfact est proposé. De même que précédemment, il est construit sur la notion de la valeur non récupérée par voie de valorisation, pour obtenir un résultat de la forme souhaitée. Il est défini par :

$$p_{ec}^j = 2 - \varepsilon_{v,ec}^j$$

avec p_{ec}^j : pertinence économique du traitement de l'artéfact dans la $j^{\text{ème}}$ voie de traitement

Un exemple de la forme de résultat attendue pour les pertinences économiques du traitement des artéfacts est présenté dans la figure 49.

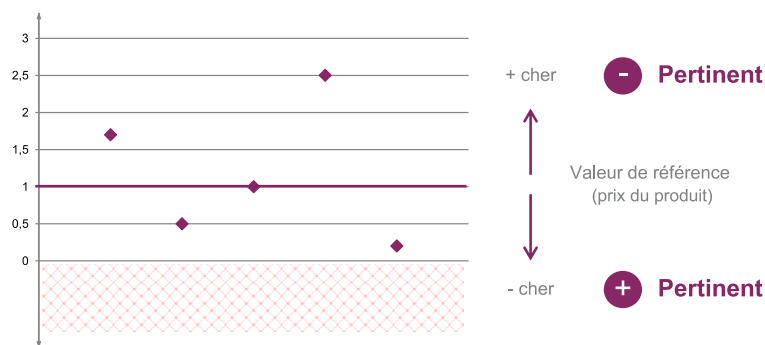


Figure 49. Exemple de forme du résultat de l'indicateur de pertinence économique du traitement proposé

De même que pour la performance technique, les résultats de pertinence économique du traitement des artéfacts s'articulent autour d'une valeur de référence égale à 1 (voir figure 49). Ainsi, une performance égale à 1 implique qu'il n'y a pas de pertes de valeur. En revanche, plus la valeur de l'indicateur augmente et s'éloigne de la valeur de référence, moins le traitement est économiquement performant (la fraction de valeur non récupérée augmentant). Lorsque nous trouvons une valeur inférieure à la valeur de référence, ceci indique un traitement économiquement plus que pertinent car il a une génération de valeur. Il s'agit d'un cas particulier qui est possible car la valeur des biens fluctue et peut aussi bien augmenter que diminuer (p. ex. tout objet de collection dont la valeur est aujourd'hui beaucoup plus importante qu'au moment de leur achat).

2.2.4.3. Évaluation de la pertinence environnementale du traitement du produit

La dimension environnementale de la valorisabilité est évaluée principalement selon trois approches dans la littérature : la toxicité des substances, la valeur environnementale du traitement en fin de vie et la valeur environnementale de la matière (voir Chapitre 3, tableau 19). La figure 50 présente un schéma de synthèse.

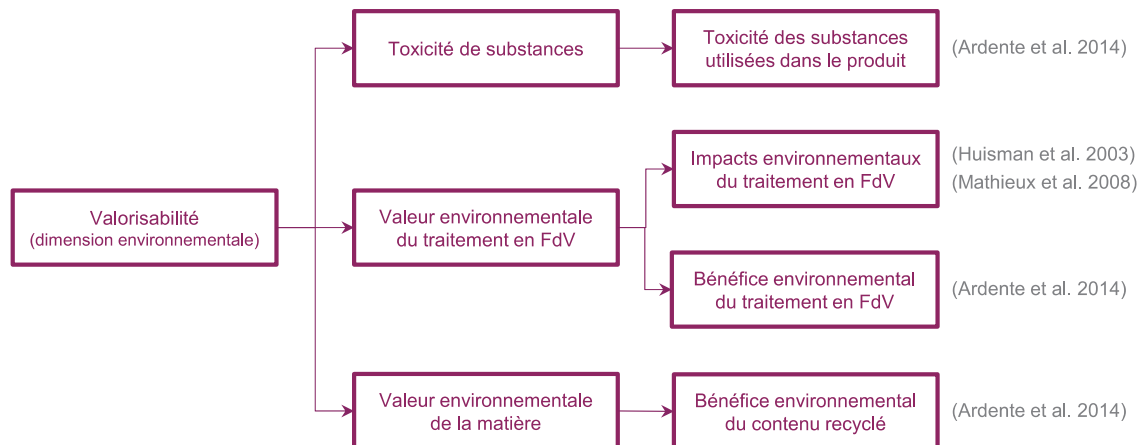


Figure 50. Évaluation de la dimension environnementale de la valorisabilité dans la littérature

2.2.4.3.1. Comparaison d'indicateurs

La pertinence environnementale du traitement en fin de vie vise à évaluer si ce traitement est plus impactant (ou moins) que la production de matières premières ou la fabrication du produit.

L'indicateur à utiliser doit donc confronter les impacts environnementaux générés par le traitement en fin de vie (p. ex. les impacts du recyclage d'un matériau ou de l'incinération des déchets ultimes) aux impacts générés lors de la production des matières premières et/ou la fabrication du produit.

Il serait ici également souhaitable que la comparaison soit faite sous forme de rapport pour mieux interpréter leur relation et faciliter ainsi à terme la prise de décision en conception.

Les indicateurs trouvés dans la littérature sont comparés au tableau 30 pour identifier ceux qui répondent aux besoins listés ci-dessus.

		Utilisation des substances toxiques (Ardente et al. 2014)	QWERTY (Huisman et al. 2003)	Impact environnemental de la valorisabilité (Mathieux 2008)	Taux de bénéfices (env.) de la réutilisabilité/ recyclabilité/ valorisabilité (Ardente et al. 2014)	Taux de bénéfices (env.) du contenu recyclé (Ardente et al. 2014)
Données FdV du produit	Impacts environnementaux du traitement en fin de vie		•	•	•	•
	Autres impacts de la fin de vie du produit					
Données vie du produit	Impacts environnementaux de la production des matières premières			•	•	•
	Impacts environnementaux de la fabrication du produit			•	•	•
	Autres impacts de la vie du produit				•	•

Tableau 30. Comparaison d'indicateurs environnementaux utilisés dans les méthodes d'évaluation de la valorisabilité du produit.

On constate que les deux premiers indicateurs ne correspondent pas aux critères définis précédemment :

- l'indicateur *utilisation des substances toxiques* proposé par Ardente et al. n'évalue ni les impacts du traitement en fin de vie, ni ceux associés à la fabrication du produit ou à la production des matières premières ;
- l'indicateur *QWERTY* proposé par Huisman et al. évalue bien les impacts générés par le traitement en fin de vie. Néanmoins, il les compare au meilleur et pire scénarios de traitement et non à la fabrication du produit ou à la production des matières premières comme souhaité.

Les autres indicateurs utilisent bien les deux types de données d'impacts que nous souhaitons comparer. Ils sont donc potentiellement intéressants pour notre méthode d'analyse :

- l'indicateur *impact environnemental de la valorisabilité* proposé par Mathieux ne correspond pas à nos besoins d'évaluation car il exprime la différence entre les bénéfices environnementaux (dans des cycles de vie successifs) associés à l'utilisation de matériaux recyclés et l'énergie récupérée des impacts environnementaux du traitement en fin de vie, qu'il ramène ensuite aux impacts environnementaux associés à la fabrication du produit ;
- les trois *taux de bénéfices environnementaux de la réutilisabilité, recyclabilité et valorisabilité* proposés par Ardente et al. ne sont pas utiles pour notre méthode d'analyse : les bénéfices environnementaux du traitement sont évalués par rapport aux impacts de tout le cycle de vie du produit ;
- enfin, le *taux de bénéfices (environnementaux) du contenu recyclé* proposé par Ardente et al. n'est pas non plus utile pour notre étude car il évalue les bénéfices environnementaux du contenu recyclé par rapport aux impacts de tout le cycle de vie du produit.

Aucun des indicateurs identifiés ne correspond donc pleinement à nos critères et nous proposons de développer un nouvel indicateur.

2.2.4.3.2. Indicateur de pertinence environnementale du traitement

L'indicateur de pertinence environnementale du traitement d'un artefact a été construit comme le rapport de la valeur environnementale du traitement en fin de vie par celle de sa production. Cependant, une agrégation est nécessaire car la dimension environnementale est évaluée sur plusieurs catégories d'impacts.

Dans notre étude, il a été considéré qu'aucune catégorie d'impact n'est plus importante qu'une autre. C'est pourquoi une moyenne de la pertinence de toutes les catégories est proposée. Un tel calcul est possible puisque la pertinence environnementale de chaque catégorie est obtenue sous forme de rapport de deux valeurs de même nature. Les valeurs en résultant sont donc adimensionnelles et ont le même niveau de référence (1) quelle que soit la catégorie. La pertinence environnementale du traitement d'un artéfact est ainsi définie par :

$$p_{en}^{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^s \frac{v_{en}^{i,j,k}}{v_{en,ref}^{i,k}}}{s}$$

avec

k : numéro de catégorie d'impact ($1 \leq k \leq s$)

$p_{en}^{i,j}$: pertinence environnementale du traitement du $i^{ème}$ artéfact dans la $j^{ème}$ voie de traitement

s : nombre de catégories d'impacts

$v_{en}^{i,j,k}$: valeur environnementale du $i^{ème}$ artéfact issu de la $j^{ème}$ voie de traitement dans la $k^{ème}$ catégorie d'impact

$v_{en,ref}^{i,k}$: valeur environnementale de référence du $i^{ème}$ artéfact dans la $k^{ème}$ catégorie d'impact

Pour mieux comprendre cette équation, quelques exemples d'éléments pris en compte dans chaque voie de valorisation sont listés ci-dessous :

- valorisation fonctionnelle

- voie de traitement : p. ex. reconditionnement ;
- artéfact issu de la voie de traitement : produit/module/composant reconditionné ;
- valeur environnementale du traitement : impact environnemental généré par le reconditionnement ;
- valeur environnementale de référence : impact environnemental généré par la fabrication du produit/module/composant neuf.

- valorisation matière

- voie de traitement : p. ex. recyclage ;
- artéfact issu de la voie de traitement : matière recyclée ;
- valeur environnementale du traitement : impact environnemental généré par le recyclage ;
- valeur environnementale de référence : impact environnemental généré par la production de la matière vierge.

- valorisation énergétique

- voie de traitement : p. ex. incinération avec récupération d'énergie ;
- artéfact issu de la voie de traitement : électricité ou chaleur ;
- valeur environnementale du traitement : impact environnemental généré par l'incinération ;
- valeur environnementale de référence : impact environnemental généré par la fabrication du produit/module/composant neuf ou par la production de la matière vierge.

- élimination

- voie de traitement : p. ex. stockage ;
- artéfact issu de la voie de traitement : aucun ;
- valeur environnementale du traitement : impact environnemental généré par le stockage ;
- valeur environnementale de référence : impact environnemental généré par la fabrication du produit/module/composant neuf ou par la production de la matière vierge.

Un exemple de la forme de résultat attendu pour les pertinences économiques du traitement des artéfacts est présenté dans la figure 51.

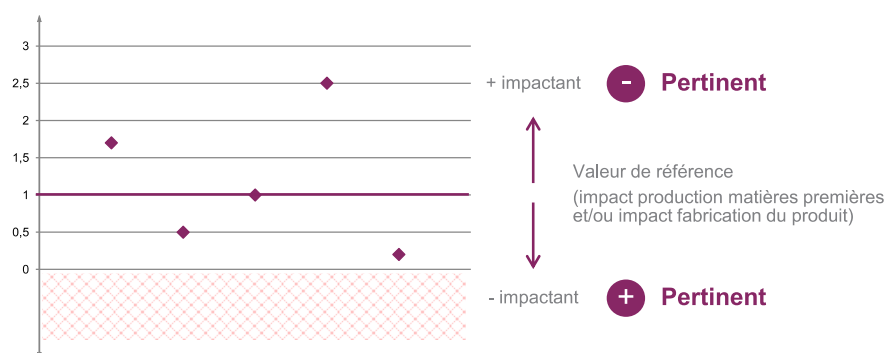


Figure 51. Forme du résultat de l'indicateur de pertinence environnementale du traitement proposé

De même que pour les indicateurs précédents, la pertinence environnementale du traitement des artéfacts varie autour d'une valeur de référence égale à 1 (voir figure 51). Une valeur supérieure à la référence désigne ainsi un traitement peu pertinent sur le plan environnemental. En effet, la valeur moyenne du traitement étant supérieure à celle de référence se révèle donc plus impactante. Dans la même logique une valeur inférieure à la référence indique un traitement pertinent dans la dimension environnementale (c.-à-d. moins impactant).

Cette forme de résultat est très avantageuse car facilement interprétable par le concepteur. En effet à titre d'exemple, si la matière recyclée génère deux fois plus d'impacts que la matière vierge, la pertinence environnemental du traitement de l'artéfact sera égale à 2 (et sera donc jugée non pertinente car supérieure à la valeur de référence de 1).

2.2.5. Sélection de la méthode de pondération des indicateurs

La pondération des indicateurs consiste à représenter l'importance accordée à chacun. Cependant, il est difficile de parvenir à une objectivation consensuelle, les coefficients utilisés résultant souvent de points de vue subjectifs ou auto-décrétés objectifs (Maurin 2007).

Dans ce cadre de la pondération et l'agrégation d'indicateurs de durabilité, Gan *et al.* (Gan et al. 2017) ont étudié les méthodes de pondération de 90 indices. Ils ont identifié que les méthodes couramment utilisées dans la littérature sont :

- la méthode de pondération égale (ou non pondérée) ;
- la méthode d'analyse des composantes principales ou méthode d'analyse factorielle ;
- l'approche fondée sur le bénéfice du doute ;
- l'analyse de régression ;
- les modèles de composants non observés ;
- la méthode d'allocation budgétaire ;
- la méthode d'opinion publique ;
- le processus de hiérarchie analytique ;
- et l'analyse conjointe.

Cette étude a mis en évidence que les méthodes de pondération égales sont les méthodes les plus utilisés dans la littérature (46,9 %) (Gan et al. 2017) (voir figure 52).

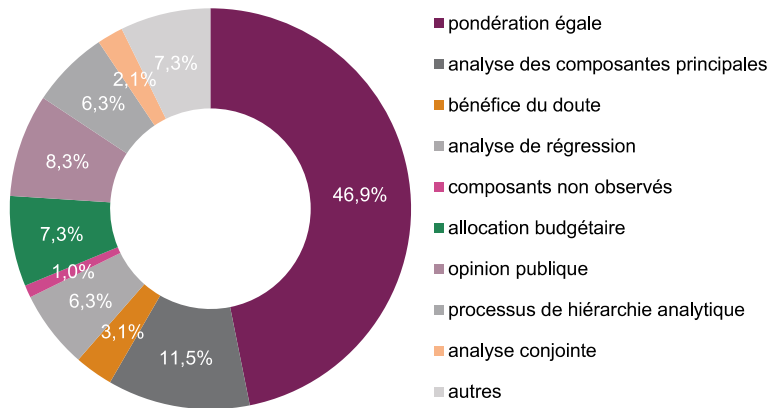


Figure 52. Proportion des méthodes de pondération d'indicateurs identifiées dans la littérature (Gan et al. 2017).

Étant donné que notre méthode d'analyse vise que les trois dimensions de la valorisabilité soient jugées au même niveau, la méthode de pondération retenue est la *méthode de pondération égale*. En d'autres termes, les indicateurs ne seront pas pondérés.

2.2.6. Sélection de la méthode d'agrégation des indicateurs

Les indices (c.-à-d. les indicateurs agrégés) réduisent des éléments complexes ou multidimensionnels à une seule grandeur utilisable pour la prise de décision (Kararach et al. 2017). Cependant, les méthodes d'agrégation sont extrêmement nombreuses.

Dans l'étude présentée au paragraphe précédent (Gan et al. 2017), Gan et al. identifient les méthodes d'agrégation les plus fréquemment utilisées dans la littérature :

- *méthodes d'agrégation additive*. Elles utilisent des fonctions qui additionnent les valeurs normalisées des indicateurs pour former l'indice. La méthode additive la plus répandue est de loin la moyenne arithmétique pondérée ;
- *méthodes d'agrégation géométrique*. Ces méthodes utilisent des fonctions multiplicatives au lieu de fonctions additives. La fonction d'agrégation géométrique la plus répandue est la moyenne géométrique pondérée ;
- *méthodes d'agrégation non compensatoires*. Ces agrégations additives et géométriques impliquent que la compensation entre les indicateurs est acceptable. Les méthodes non compensatoires sont utilisées lorsque cette compensation est jugée inacceptable. Le résultat d'une telle méthode est plus un rang qu'une valeur concrète. Comme aucune compensation entre les indicateurs de la méthode n'est permise, tous les coefficients de pondération reflètent l'importance relative de chaque indicateur plutôt qu'un rapport comparatif.

Cette étude montre ainsi que les méthodes d'agrégation additive sont de loin (86,5 %) les méthodes les plus utilisées dans la littérature (voir figure 53).

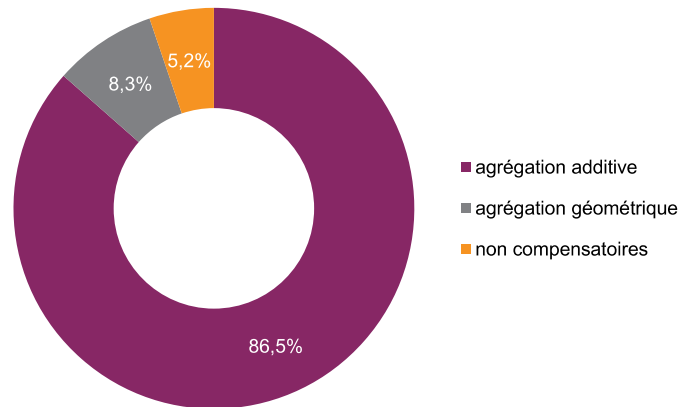


Figure 53. Proportion des méthodes d'agrégation d'indicateurs identifiées dans la littérature (Gan et al. 2017).

Dans le cadre de l'agrégation d'indicateurs environnementaux, Maurin a proposé un indice global de pollution de l'air (Maurin 2007). La définition de l'indice a été menée sur une construction mathématique argumentée et analysant un grand nombre de fonctions mathématiques au vu du comportement attendu pour l'indice. Cette méthode d'agrégation a été trouvée pertinente pour notre démarche. En effet, l'indice traduit de meilleure façon tout effort fait sur les moins bons indicateurs, c'est-à-dire ceux exprimant les choix les moins pertinents. Il est en outre conforté par l'exhaustivité et la rigueur de sa méthode de construction. C'est pourquoi il n'a pas été jugé nécessaire d'étudier d'autres méthodes d'agrégation.

Les indicateurs sont construits sous forme de rapport, sur une échelle ouverte et de manière à avoir une valeur de référence commune. Ils sont tous définis de la façon suivante :

$$x_i = x_u \frac{g_i}{g_{i,ref}}$$

avec

g_i : $i^{\text{ème}}$ grandeur physique mesurée

$g_{i,ref}$: $i^{\text{ème}}$ grandeur de référence

x_i : $i^{\text{ème}}$ indicateur à agréger

x_u : valeur commune de référence

La construction de l'indice a été réalisée à partir de l'agrégation d'indicateurs élémentaires et en introduisant six principes :

- l'invariance par permutation des indicateurs ;
- l'efficacité en faveur de la réduction des indicateurs les plus élevés ;
- la séparation des variables moyenne et dispersion afin de noter l'effet de chacun d'eux, et trois déclinaisons différentes d'un principe d'homogénéité :
 - l'appartenance de l'indice au même ensemble que les indicateurs ;
 - la préservation d'un intervalle de variation commun entre les variables d'entrée et de sortie ;
 - la pérennité d'une valeur de référence commune entre les variables d'entrée et de sortie.

L'étude est centrée sur des calculs algébriques. Dans un premier temps, les fonctions symétriques fondamentales, algébriques et homogènes de degré 1 à n ont été considérées. Cependant, il a montré qu'en avançant un principe d'efficacité en faveur de la réduction des valeurs élevées, il faut envisager d'autres fonctions que les symétriques fondamentales. Les puissances $1/k$ des fonctions symétriques ont ensuite été

considérées mais le même effet décourageant a été remarqué.

Fort de ces constats, le recours aux seules fonctions polynômes a été abandonné et l'utilisation des transformées algébriques (ou transcendentes des indices initiaux) et des fonctions symétriques aux nouvelles quantités ont été envisagées.

Afin de définir la transformée à utiliser, un septième principe à l'image du rasoir d'Ockham³⁴ a été introduit. Le but étant de simplifier le formalisme et de justifier l'exclusion de fonctions trop complexes et probablement inutiles. Ceci a conduit l'utilisation des formes symétriques des transformées d'indicateurs, moyennant une transformation par application positive croissante convexe nulle à l'origine, et plus précisément une transformation exponentielle unique. Cette famille de transformation a bien respectée les principes établis. L'indice a donc été défini comme suit :

$$I_g = \frac{\sum h(x_i)}{n} \quad \text{où } h(x_i) = e^{cx_i} - 1$$

avec

$h(x_i)$: transformation du $i^{\text{ème}}$ indicateur à agréger

I_g : indice globale

n : nombre d'indicateurs agrégés

En ce qui concerne le choix du paramètre c , l'étude a révélé deux possibilités. La proposition retenue prends des indicateurs élémentaires x_i directement comparable à l'indice global I_g et oscillent autour de la valeur commune de référence. La possibilité retenue est donc la suivante :

$$c = \frac{\ln(1 + x_u)}{x_u}$$

On constate que la valeur de c dépend uniquement de la valeur de commune référence x_u définie en amont lors de la construction des indices individuels.

2.2.7. Proposition d'indice de valorisabilité d'un produit

L'indice de valorisabilité d'un artéfact est construit de la même façon que l'indice global proposé par Maurin (Maurin 2007). En fixant la valeur de référence à 1 (pour chaque indicateur technique, économique ou environnemental), la fonction de transformation prend la forme présentée à la figure 54.

³⁴ Principe indiquant que *la pluralité des notions ne devrait pas être posée sans nécessité*. Il est parfois aussi appelé principe de simplicité, d'économie ou de parcimonie.

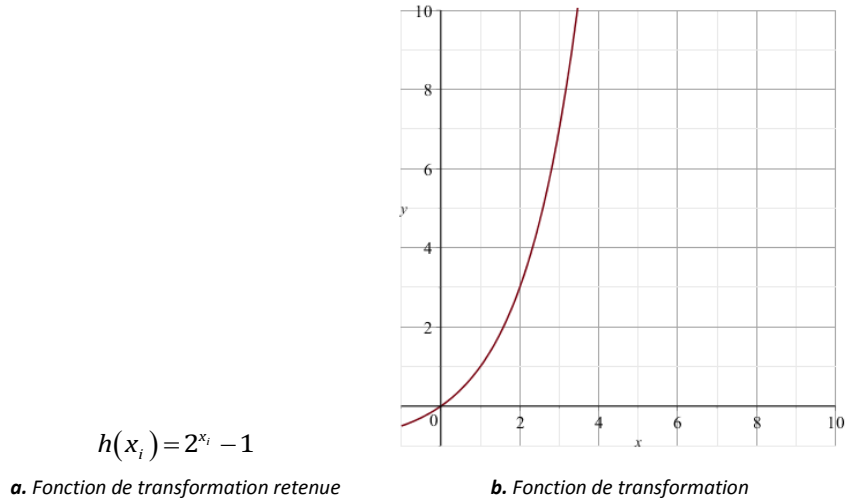


Figure 54. Fonction de transformation des indicateurs retenue

L'indice de valorisabilité peut ainsi être défini comme suit :

$$V_a^i = \frac{\sum_{k=0}^{n_i} h(v_a^{i,l})}{n_i} \quad \text{où } h(v_a^{i,l}) = 2^{v_a^{i,l}} - 1$$

avec

- l : numéro d'indicateur de valorisabilité ($1 \leq l \leq o$)
- n_i : nombre d'indicateurs de valorisabilité à agréger
- V_a^i : indice de valorisabilité du $i^{\text{ème}}$ artefact
- $v_a^{i,l}$: $l^{\text{ème}}$ indicateur de valorisabilité à agréger du $i^{\text{ème}}$ artefact

2.3. Étape 2.

Aide à la décision en conception

2.3.1. Description de la méthode d'aide à la décision en conception

Cette étape vise à lier l'évaluation de la valorisabilité d'un produit et les lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie, afin que le concepteur puisse mieux interpréter les résultats et informations auxquels il est confronté, et simplifier d'autant son processus de conception. Elle est divisée en trois étapes :

- *L'identification des hotspots³⁵ du produit.* Les artefacts (c.-à-d. les composants et les constituants) du produit sont hiérarchisés en fonction de valorisabilité évaluée à l'étape précédente, de la valeur la plus petite à la plus haute. Une telle hiérarchisation permet d'identifier facilement les artefacts problématiques (c.-à-d. les *hotspots*), autrement dit les moins valorisables (valeurs les plus élevées) dans les trois dimensions retenues (c.-à-d. technique, économique et environnementale). L'artefact identifié comme étant le plus problématique (le dernier du classement) est retenu ;

³⁵ Un *hotspot* est un aspect à traiter en priorité. Par exemple lors d'une ACV, un *hotspot* est une étape du cycle de vie, un processus ou un flux élémentaire qui compte pour une proportion importante de l'impact de l'unité fonctionnelle (UNEP et SETAC 2017).

- *L'identification des hotspots de l'artéfact.* La performance des caractéristiques de l'artéfact retenu est évaluée par rapport à un objectif ou à une référence. De même, les caractéristiques évaluées sont hiérarchisées de la plus performante à la moins performante et la dernière du classement est retenue ;
- *La proposition des stratégies d'améliorations.* Des pistes d'amélioration pour l'artéfact en question sont proposées pour la ou les caractéristiques problématiques, grâce à un guide outillé basé sur des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie.

Les deuxième et troisième étapes peuvent être reconduites pour d'autres artéfacts identifiés comme problématiques si le concepteur souhaite en reconcevoir plusieurs parallèlement.

2.3.2. Outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie

2.3.2.1. Description de la démarche d'outillage

Aujourd'hui, la littérature concernant les démarches de conception pour X (dont la conception pour la fin de vie) propose plusieurs lignes directrices à l'usage du concepteur, mais ne précise pas laquelle utiliser. C'est pourquoi nous proposons ici d'associer à chaque ligne directrice un levier d'action et à chaque levier un indicateur d'évaluation ; c'est ce que nous appelons l'outillage des lignes directrices.

Dans ce cadre, 33 leviers d'action en conception ont été identifiés dans le chapitre précédent (Chapitre 3, § 3.1.4). Certains peuvent être regroupés par familles. En effet, un nombre conséquent de ces leviers s'intéressent (de façon directe ou indirecte) à des problématiques associées à la démontabilité de l'artéfact. Le regroupement de ces leviers d'action est présenté au paragraphe démontabilité et remontabilité (§ 2.3.2.2.3). De plus, nous notons aussi que les leviers d'action de compatibilité, diversité et recyclabilité des matériaux peuvent être associées pour évaluer la recyclabilité de l'artéfact (voir § 2.3.2.2.8). Enfin, les deux leviers d'action qui intéressent à la standardisation ont aussi été regroupés (§ 2.3.2.2.10). Les autres seront abordés séparément.

2.3.2.2. Définition d'indicateurs associés aux leviers d'action de choix de conception et mise en correspondance avec les lignes directrices

Tel qu'évoqué dans le chapitre précédent, il est important de savoir si les caractéristiques du produit que l'on souhaite ou doit modifier sont performantes par rapport à un objectif ou une référence. Cette partie s'intéresse ainsi à définir les indicateurs et les indices de performance associés aux leviers d'action de choix de conception (voir Chapitre 3, figure 42). On présentera ensuite les lignes directrices à utiliser dans le cas où le levier d'action est identifié comme non performant.

Pour comparer la performance des leviers d'action, la valeur des indicateurs de performance des leviers d'action doit être exprimée sur une même échelle. Nous définissons ainsi que les indicateurs et indices utilisés pour évaluer la performance des leviers d'action doivent avoir les caractéristiques suivantes :

- la valeur du résultat doit être contenue dans l'intervalle de 0 à 1 ;
- la valeur de 1 doit correspondre à la meilleure note et 0 à la pire.

Les indicateurs n'ayant pas cette forme devront être normalisés.

Lorsque l'agrégation d'indicateurs est nécessaire, la méthode de construction formelle d'un indice de Maurin (Maurin 2007) sera utilisée comme référence. Dans son analyse, les fonctions symétriques fondamentales, algébriques et homogènes de degré 1 à n ont été étudiées. Il a montré que :

- pour la fonction de degré 1, la variation de chaque indicateur x_i intervient de la même manière dans l'indice ;

- pour la fonction de degré n , il a été observé que pour un minimum de x_i , la dérivée partielle $\partial s_n / \partial x_i$ est la plus élevée et pour le max x_i , la dérivée est la plus faible. La fonction est donc sensible aux valeurs les plus faibles ;
- pour les fonctions symétriques intermédiaires (d'ordre 2 à $n-1$), le même comportement que pour la fonction de degré n a été identifié.

Le choix de de fonction agrégation sera réalisé en fonction des besoins particuliers à partir des constats évoqués ci-dessous.

2.3.2.2.1. Biodégradabilité des matériaux

La biodégradabilité est la capacité intrinsèque d'un matériau à être dégradé par une attaque microbienne et se convertir facilement en eau, CO₂ et/ou CH₄ et une nouvelle biomasse (ADEME 2005).

Les normes les normes concernées par la biodégradabilité et son évaluation sont :

- la Directive 94/62/CE sur les emballages et déchets d'emballages (Parlement Européen et Conseil de l'Union Européenne 1994) ;
- la norme EN 13432 du Comité Européen de normalisation qui établit les caractéristiques qu'un matériau doit posséder pour pouvoir être qualifié de biodégradable ou compostable (AFNOR 2000). Les caractéristiques évaluées sont la composition chimique, la biodégradation, la désintégration, et la qualité du compost final et son écotoxicité ;
- les normes ISO 14855-1 et 14855-2 qui s'intéressent à mesurer la biodégradabilité des plastiques dans des conditions de compostage contrôlées (ISO 2012; 2018).

De même que pour l'indicateur de criticité, l'indicateur de biodégradabilité proposé ici a besoin d'une base de données. L'indicateur est donc défini comme suit : si le matériau est identifié comme étant biodégradable, la meilleure note doit être attribuée (la pire dans le cas contraire). Lorsqu'il n'y a pas d'information disponible, une note intermédiaire est attribuée. L'indicateur proposé est présenté dans le tableau 31.

Cas	B_m
Le matériau est identifié comme biodégradable	1
Le matériau n'est pas identifié comme biodégradable	0
Il n'y a pas d'informations sur la biodégradabilité du matériau	0,5

Tableau 31. Indicateur de biodégradabilité des matériaux

où B_m désigne la biodégradabilité du matériau.

Le tableau 32 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la biodégradabilité de ses matériaux.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Matériaux	Privilégier l'utilisation des matériaux et substances biodégradables	Valorisation énergétique Élimination

Tableau 32. Lignes directrices associées au levier d'action biodégradabilité

2.3.2.2.2. Circularité des matériaux

L'évaluation de la circularité d'un produit ou des matériaux est un sujet d'actualité largement abordé dans la littérature, mais sans réel consensus. En effet, le centre de recherche sur les politiques en économie circulaire SUMMA a identifié 33 indicateurs dont l'origine repose principalement sur des tableaux de bord et des cadres de suivi élaborés par l'Union Européenne, et sur des rapports du JRC et de l'EEA (Vercalsteren, Christis, et Van Hoof 2018). Une autre étude en a identifié plus de 50 issus de travaux universitaires, de sociétés de consultants et d'organismes gouvernementaux (Saidani 2018).

L'indicateur de circularité des matériaux proposé par la Fondation Ellen MacArthur semble être le plus répandu dans la littérature. Il mesure la proportion dans laquelle le flux linéaire de matériaux a été minimisé et le flux inverse maximisé, ainsi que la durée et l'intensité de son utilisation par rapport à un produit moyen similaire dans l'industrie. Le MCI (de l'anglais Material Circularity Indicator), dont la valeur est comprise entre 0 et 1, est construit à partir de la combinaison de trois caractéristiques du produit : la masse de matière vierge utilisée dans la fabrication, la masse de déchets irrécupérables attribuée au produit et un facteur d'utilité tenant compte de la durée et de l'intensité de l'utilisation du produit. (Ellen MacArthur Foundation 2015)

La circularité est donc une grandeur évaluée à partir de plusieurs critères. Dans notre approche, le levier d'action de circularité ne s'intéresse qu'à l'évaluation de l'utilisation de la matière recyclée, c'est-à-dire sa capacité à réintégrer la chaîne d'approvisionnement conventionnelle dans un nouveau cycle. Dans ce cadre, la Commission Européenne a publié *Raw Materials Scoreboard* (European Commission et Directorate-General for Internal Market 2018) pour fournir des données quantitatives sur les matières premières. Dans ce document, l'indicateur des taux d'intrants du recyclage en fin de vie ou EOL-RIR (End-Of-Life Recycling Input Rates) est proposé dans le volet économie circulaire et recyclage. Il est défini comme l'intrant total de matière provenant du recyclage des déchets post-consommation (c.-à-d. de la filière de traitement en fin de vie) dans le système de production.

Un indicateur similaire au EOL-RIR est le taux d'utilisation de matériau circulaire ou CMU (Circular Material Use rate) utilisé dans Eurostat pour mesurer la part des matières récupérées et réinjectées dans le circuit de la production par rapport à l'utilisation globale des matières premières (Eurostat s. d.). La différence principale avec l'EOL-RIR est que le CMU analyse la contribution de tous les matériaux recyclés et non celle d'un seul matériau.

L'indicateur EOL-RIR a été jugé comme le plus pertinent pour notre démarche. D'une part, il évalue bien l'utilisation secondaire de la matière recyclée dans la production de matières premières (et correspond donc au levier d'action), d'autre part, il s'agit d'un indicateur proposé par la Commission Européenne dont les données sur les matériaux sont facilement accessibles et régulièrement mises à jour. L'indicateur de circularité d'un matériau est donc exprimé comme suit :

$$ci_m = EOL - RIR = \frac{m_{rmp}}{m_{tpp}}$$

avec

- ci_m : circularité du matériau
- m_{rmp} : masse du matériau issue du recyclage entrant dans la production de matières premières
- m_{tpp} : masse totale du matériau entrant dans la production de matières premières

Une note globale caractérisant la circularité de tous les matériaux du produit est nécessaire. Nous souhaitons que la variation de chaque indicateur (c.-à-d. la circularité de chaque matériau) intervienne de la même

manière dans l'indice. C'est pourquoi, la fonction symétrique fondamentale, algébrique et homogène de degré 1 sous forme de moyenne a été retenue. L'indice de circularité des matériaux est donc défini comme suit :

$$Ci_m = \frac{\sum_{i=1}^u ci_m^i}{u}$$

avec

Ci_m : circularité des matériaux

ci_m^i : circularité du $i^{ème}$ matériau

u : nombre de matériaux

Le tableau 33 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la circularité de ses matériaux.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Matériaux	Conception tenant compte de l'utilisation secondaire des matières recyclées	Valorisation matière

Tableau 33. Lignes directrices associées au levier d'action circularité

2.3.2.2.3. Démontabilité et remontabilité du produit

Le démontabilité exprime l'aptitude à être démonté (Office Québécois de la Langue Française s. d.). Tel qu'évoqué précédemment, nous avons identifié qu'un grand nombre des leviers d'action liés de façon directe ou indirecte à la démontabilité du produit. Le regroupement des leviers d'actions est présenté à la figure 55.

La démontabilité d'un produit est ainsi fonction de quatorze paramètres (voir figure 55). Un indice permettant d'agrèger les indices et indicateurs associés est nécessaire. Nous souhaitons que la variation de chaque indicateur intervienne de la même manière dans l'indice. C'est pourquoi, la fonction symétrique fondamentale, algébrique et homogène de degré 1 sous forme de moyenne a été retenue. La démontabilité du produit est donc définie comme suit :

$$De_p = \frac{A_c + A_f + Co_p + Co_{sc} + Co_{sf} + De_c + De_f + Di_f + D_{to} + Du_f + M_p + Rp_c + Rp_f + S_f}{14}$$

avec

A_c : accessibilité aux composants

A_f : accessibilité aux fixations

Co_p : complexité du produit

Co_{sc} : complexité du système de câblage

Co_{sf} : complexité du système de fixation

De_c : démontabilité de l'ensemble des composants

De_f : démontabilité de l'ensemble des fixations

De_p : démontabilité du produit

Di_f : diversité des fixations

- Di_o : diversité d'outils de (dé)montage
- Du_f : durabilité de l'ensemble des fixations
- M_p : modularité du produit
- Rp_c : réparabilité des composants
- Rp_f : réparabilité des fixations
- S_f : standardisation des fixations

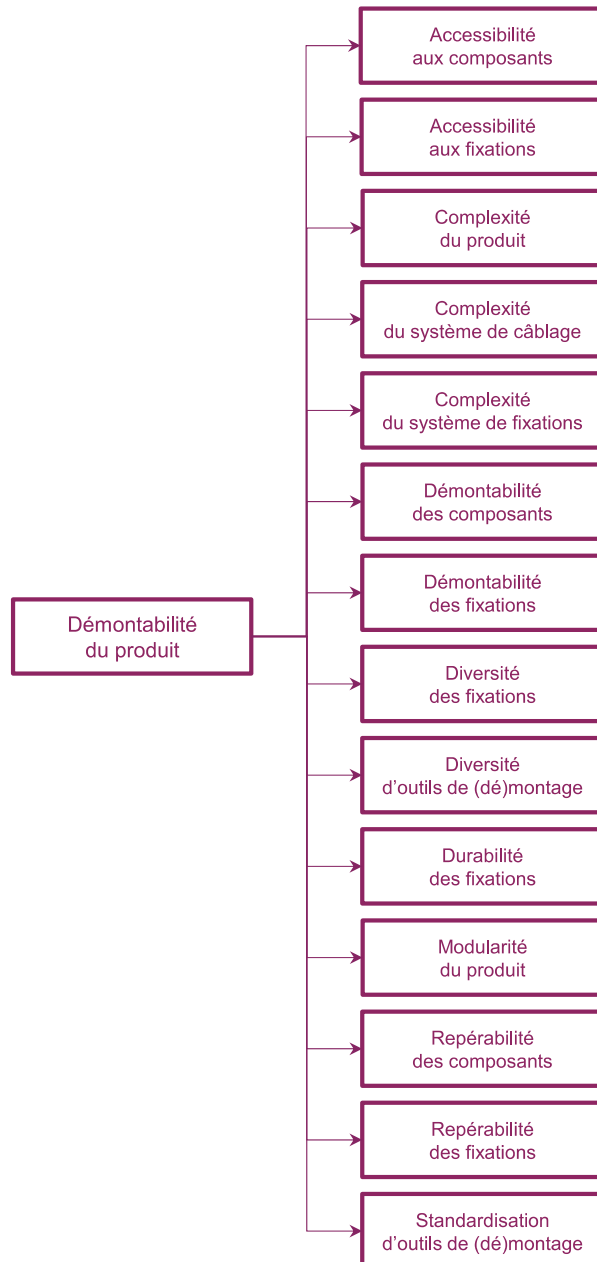


Figure 55. Regroupement des leviers d'action liés au démontage

En outre, la *remontabilité du produit* a été définie de façon similaire à la démontabilité. Elle est également construite à partir du regroupement de quatorze leviers d'action où seuls la *remontabilité des composants* et la *remontabilité des fixations* diffèrent.

2.3.2.2.3.1. Accessibilité aux composants

L'accessibilité aux composants est un facteur qui contribue directement et proportionnellement à la démontabilité du produit. Plus un composant est accessible, plus la qualité du démontage augmente. Dans ce cadre, quelques indicateurs d'accessibilité ont été identifiés :

- Alonso Movilla, et al. proposent un indicateur d'accessibilité aux composants pour mettre en œuvre un indice de liaison (Alonso Movilla et al. 2013). L'indicateur est défini entre 0 et 1 (où 1 correspond à la meilleure note). La note est attribuée selon les cas suivants : accessibilité directe (1), accessibilité indirecte mais simple (0,5) et accessibilité indirecte et compliquée (0,2) ;
- De Aguiar *et al.* ont proposé un indicateur d'accessibilité dans le cadre de la création des métriques d'évaluation de la démontabilité d'un produit (de Aguiar et al. 2017). L'indicateur est défini entre 1 et 4 (où 4 est la plus mauvaise note). La note est attribuée selon l'un des quatre cas suivants : accès libre (1), 50 % ou plus accessible (2), 50 % ou plus inaccessible (3) et inaccessible (4).

Nous avons décidé d'utiliser le premier indicateur proposé par Alonso Movilla *et al.* car il est simple à utiliser et correspond à notre forme normalisée des indicateurs. L'indicateur d'accessibilité au composant retenu pour notre démarche est présenté dans le tableau 34.

Cas	a_c
L'accessibilité au composant est directe	1
L'accessibilité au composant est indirecte mais simple	0,5
L'accessibilité au composant est indirecte et compliquée	0,2
Le composant n'est pas accessible	0

Tableau 34. Indicateur d'accessibilité au composant

où a_c désigne l'accessibilité au composant.

Une note globale caractérisant l'accessibilité à tous les composants du produit est nécessaire. Nous souhaitons que la variation de chaque indicateur (c.-à-d. l'accessibilité à chaque composant) intervienne de la même manière dans l'indice. C'est pourquoi, la fonction symétrique fondamentale, algébrique et homogène de degré 1 sous forme de moyenne a été retenue. L'indice d'accessibilité aux composants est donc défini comme suit :

$$A_c = \frac{\sum_{j=1}^m a_c^j}{m}$$

avec

- a_c^i : accessibilité au $i^{ème}$ composant
- A_c : accessibilité aux composants
- m : nombre de composants du produit

Le tableau 35 montre les lignes directrices à appliquer lorsque le composant analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de son accessibilité.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Composants	Les consommables ainsi que les composants avec une valeur économique élevé ou ceux qui sont facilement endommageables doivent être facilement accessibles	Valorisation fonctionnelle
	Les composants contenant des matériaux non recyclables, non compatibles, toxiques, précieux, rares et critiques doivent être facilement accessibles	Valorisation matière

Tableau 35. Lignes directrices associées au levier d'action accessibilité aux composants

2.3.2.2.3.2. Accessibilité aux fixations

De même que pour l'accessibilité aux composants, l'accessibilité aux fixations est un facteur qui contribue directement et proportionnellement à la démontabilité du produit. Plus une fixation est accessible, plus le démontage est facile. L'indicateur d'accessibilité aux fixations est construit à partir d'une extrapolation de l'indicateur d'accessibilité aux composants (voir § 2.3.2.2.3.1). Il est défini dans le tableau 36.

Cas	a_f
L'accessibilité à la fixation est directe	1
L'accessibilité à la fixation est indirecte mais simple	0,5
L'accessibilité à la fixation est indirecte et compliquée	0,2
La fixation n'est pas accessible	0

Tableau 36. Indicateur d'accessibilité à la fixation

où a_f désigne l'accessibilité à la fixation.

Une note globale caractérisant l'accessibilité à toutes les fixations est nécessaire. Nous souhaitons que la variation de chaque indicateur (c.-à-d. l'accessibilité à chaque fixation) intervienne de la même manière dans l'indice. C'est pourquoi, la fonction symétrique fondamentale, algébrique et homogène de degré 1 sous forme de moyenne a été retenue. L'indice d'accessibilité aux fixations est donc défini comme suit :

$$A_f = \frac{\sum_{i=1}^v a_f^i}{v}$$

avec

a_f^i : accessibilité à la $i^{\text{ème}}$ fixation

A_f : accessibilité aux fixations

v : nombre de fixations

Le tableau 37 montre les lignes directrices à appliquer lorsque le composant analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de l'accessibilité à ses fixations.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Fixations	Les fixations doivent être facilement accessibles (y compris l'espace nécessaire pour l'outil de démontage)	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière

Tableau 37. Lignes directrices associées au levier d'action accessibilité aux fixations

2.3.2.2.3.3. Complexité du produit

La complexité du produit (en termes du nombre de composants) est un facteur qui contribue de façon inversement proportionnelle à la démontabilité du produit. Une étude comparative (non exhaustive) de fonctions mathématiques ayant ce comportement a été réalisée (voir figure 56).

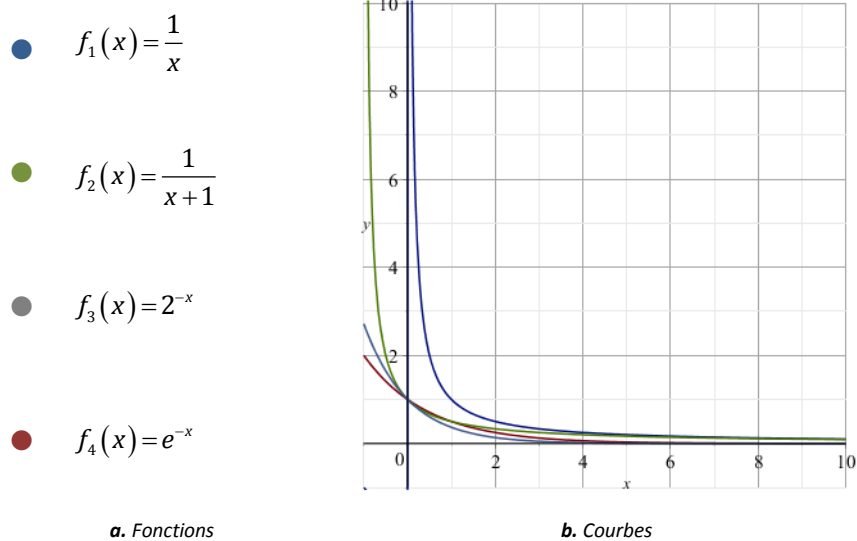


Figure 56. Comparaison des fonctions mathématiques

Il peut être observé à la figure 56 que l'ensemble des fonctions analysées décroissent très rapidement ; ceci exprime qu'elles fournissent un mauvais score très rapidement. C'est pourquoi, un paramétrage de l'une des fonctions a été retenu pour l'ajuster à nos attentes.

L'indicateur de complexité du produit est ainsi défini comme suit :

$$Co_p = \frac{1}{k_{cp}(m-1)+1}$$

avec

Co_p : complexité du produit

k_{cp} : coefficient de complexité du produit

m : nombre de composants du produit

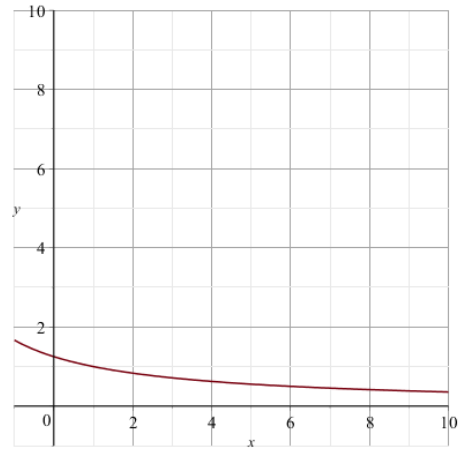
Le coefficient k_{cp} permet d'atténuer la vitesse de décroissance de la courbe. Il dépend du degré de complexité de la typologie du produit analysé.

La fonction utilisée est présentée à la figure 57. Pour notre idéal (c.-à-d. un produit constitué d'un seul

composant), la fonction retenue fournit bien le meilleur score possible (égal à 1). Elle fournit également la moitié de ce score (0,5) lorsque m est égal à 6.

$$f(x) = \frac{1}{0,2(x-1)+1}$$

a. Fonction retenue



b. Courbe

Figure 57. Fonction retenue pour l'évaluation de la complexité du produit

Le tableau 38 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la complexité du produit.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Produit	Minimiser le nombre de composants	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière

Tableau 38. Lignes directrices associées au levier d'action complexité du produit

Il faut noter que pour les produits complexes (p. ex. les véhicules et les équipements électroniques), cet indicateur donnera une note très faible même sur leurs versions les plus simples. C'est pourquoi, cet indicateur devrait être exclu de l'analyse de tels produits.

2.3.2.2.3.4. Complexité du système de câblage

La complexité du système de câblage est un facteur qui contribue de façon inversement proportionnelle à la démontabilité du produit ; plus un système de câblage est complexe, plus l'opération de démontage est ardue. C'est pourquoi, la fonction de base utilisée dans l'évaluation de la complexité du produit a été paramétrée de façon similaire.

L'indicateur de complexité du système de câblage est donc défini par :

$$Co_{sc} = \frac{1}{k_{csc} n_{cc} + 1}$$

avec

Co_{sc} : complexité du système de câblage

k_{csc} : coefficient de complexité du système de câblage

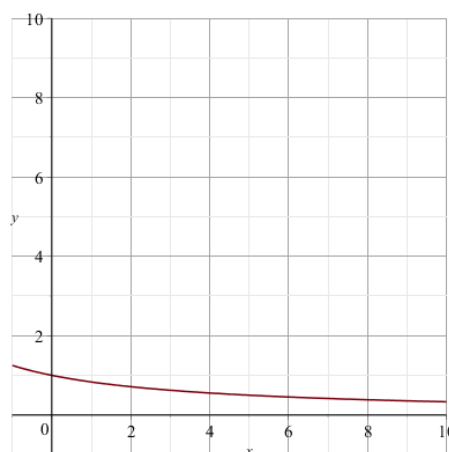
n_{cc} : nombre de câbles de connexion

Le coefficient k_{csc} a la même fonction que le coefficient précédent (c.-à-d. atténuer la vitesse de décroissance de la courbe). Il dépend du degré de complexité du système de câblage moyen (associé à la typologie du produit analysé).

La fonction utilisée est présentée à la figure 58. Pour notre idéal (c.-à-d. produit constitué d'aucun câble), la fonction retenue fournit bien le meilleur score possible à 1. Elle fournit également la moitié de ce score (0,5) lorsque n_{cc} est égal à 5.

$$f(x) = \frac{1}{0,2x + 1}$$

a. Fonction retenue



b. Courbe

Figure 58. Fonction retenue pour l'évaluation de la complexité du système de câblage

Le tableau 39 montre les lignes directrices à appliquer lorsque le composant analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la complexité de son système de câblage.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Câbles et connecteurs	Minimiser le nombre et la longueur des fils ou câbles d'interconnexion utilisés	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière

Tableau 39. Lignes directrices associées au levier d'action complexité du système de câblage

2.3.2.2.3.5. Complexité du système de fixation

La complexité du système de fixation (en termes du nombre de fixations) est un facteur qui contribue de façon inversement proportionnelle à la démontabilité du produit ; plus le système de fixations est complexe, plus l'opération de démontage est difficile.

De Aguiar *et al.* ont proposé l'indicateur *nombre de fixations* dans le cadre de la création des métriques d'évaluation de la démontabilité d'un produit (de Aguiar et al. 2017). Cependant, ils ont précisé que le nombre de fixations nécessaire pour chaque composant variait en fonction de ses dimensions et de sa géométrie, et

qu'il n'était donc pas possible d'établir une valeur maximale de cet indicateur. Pour contrer ce problème, ils ont proposé l'indicateur *pourcentage de fixations*. Il est construit comme le nombre de fixations à utilisées dans le composant ramené au nombre total de fixations dans le produit.

Nous considérons qu'aucune de ces deux propositions n'est intéressante dans notre démarche. En effet, le premier indicateur quantifie uniquement le nombre de fixations : cela ne correspond pas à nos besoins car il ne permet pas de savoir si ce nombre est pertinent ou pas. Pour le deuxième, si l'on évalue le cas d'un système de démontage n'utilisant qu'une seule fixation pour l'ensemble des composants, la pire note est obtenue.

Nous trouvons plus pertinent d'utiliser la relation inversement proportionnelle entre la démontabilité du produit et la complexité du système de fixation comme base de construction. La complexité du système de fixation a alors le même type de comportement que celle du système de câblage ; c'est pourquoi nous utiliserons la même fonction (voir figure 58). L'indicateur de complexité du système de fixation est donc défini comme suit :

$$Co_{sf} = \frac{1}{k_{csf}v + 1}$$

avec

Co_{sf} : complexité du système de fixation du composant

k_{csf} : coefficient de complexité du système de fixation

v : nombre de fixations du composant

Le coefficient k_{csf} a la même fonction que les coefficients précédents. Il dépend du degré de complexité du système de fixation moyen (associé à la typologie du produit analysé).

La fonction utilisée est présentée à la figure 58. Pour notre idéal (c.-à-d. produit constitué d'aucune fixation), la fonction fournit bien le meilleur score possible (égal à 1). Elle fournit également la moitié de ce score (0,5) lorsque v est égal à 5.

Le tableau 40 montre les lignes directrices à appliquer lorsque le composant analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la complexité de son système de fixation.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Fixations	Minimiser le nombre de fixations	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière

Tableau 40. Lignes directrices associées au levier d'action complexité du système de fixation

Il faut noter que les systèmes de fixation sont généralement composés de plusieurs fixations. C'est pourquoi, le système d'assemblage sera probablement souvent considéré comme non performant.

2.3.2.2.3.6. Démontabilité et remontabilité des composants

Fairphone® mesure la démontabilité de ses composants à partir d'un score fonction du temps nécessaire au démontage (Güvendik 2014). Le score est attribué par plages de 60 secondes. Par exemple, si le démontage d'un composant dure moins d'une minute, il obtient un score de 1 ; s'il est compris entre 61 et 120 secondes il obtient un score de 2 ; et ainsi de suite de minute en minute.

Nous constatons ainsi que le temps de démontage est un facteur qui contribue à la démontabilité du produit de façon indirectement proportionnelle. C'est pourquoi, la fonction inverse est utilisée avec le score de temps proposé par Fairphone® comme paramètre. L'indicateur de démontabilité des composants est donc défini comme suit :

$$de_c = \frac{1}{s_t}$$

avec

de_c : démontabilité du composant

s_t : score de temps de démontage

Une note globale caractérisant la démontabilité de tous les composants du produit est nécessaire. Nous souhaitons que la variation de chaque indicateur (c.-à-d. la démontabilité de chaque composant) intervienne de la même manière dans l'indice. C'est pourquoi, la fonction symétrique fondamentale, algébrique et homogène de degré 1 sous forme de moyenne a été retenue. L'indice de démontabilité de l'ensemble des composants est donc défini comme suit :

$$De_c = \frac{\sum_{i=1}^m de_c^i}{m}$$

avec

de_c^i : démontabilité du $i^{ème}$ composant

De_c : démontabilité de l'ensemble des composants

m : nombre de composants du produit

Le tableau 41 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la démontabilité des composants.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Produit	Réduire le temps et le nombre d'étapes de démontage	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière
	Augmenter la linéarité de la séquence de démontage	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière
	Minimiser les divergences de sens de la séquence de démontage	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière
	Homogénéiser les principes d'assemblage et de désassemblage	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière
	Concevoir le produit de manière à ce qu'il puisse être transporté facilement après son utilisation (c.-à-d. en permettant un prédémontage)	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière
Composants	Les consommables ainsi que les composants avec une valeur économique élevé ou ceux qui sont facilement endommageables doivent être facilement enlevés	Valorisation fonctionnelle
	Les composants contenant des matériaux non recyclables, non compatibles, toxiques, précieux, rares et critiques doivent être facilement enlevés	Valorisation matière
	Lorsque les matériaux des pièces ou des sous-ensembles inséparables ne sont pas compatibles, faire en sorte qu'ils soient facilement séparables	Valorisation matière
	Faciliter la séparation des composants contenant des matériaux et substances qui pourraient compromettre l'efficacité de la combustion (avec une faible valeur énergétique)	Valorisation énergétique Élimination
	Concevoir les pièces pour la stabilité lors du démontage	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière

Tableau 41. Lignes directrices associées au levier d'action démontabilité des composants

En outre, la *remontabilité des composants* suit la même logique que sa démontabilité. Les indicateurs développés ci-dessus seront ainsi utilisés pour analyser le remontage des composants en les multipliant par un facteur de remontabilité (voir tableau 42).

Cas	frm_c
Le démontage est réversible et sans endommagement du composant	1
Le démontage est réversible mais avec endommagement du composant	0,5
Le démontage n'est pas réversible (c.-à-d. destructif)	0

Tableau 42. Facteur de remontabilité des composants

2.3.2.2.3.7. Démontabilité et remontabilité des fixations

La démontabilité des fixations (c.-à-d. la facilité à enlever les fixations) est un facteur qui contribue à l'indice de démontabilité du produit de façon directement proportionnelle. Plus une fixation est démontable, plus c'est bénéfique pour le démontage.

De Aguiar *et al.* ont proposé l'indicateur *type de fixation* qui définit la facilité de démontage des fixations (de Aguiar *et al.* 2017). Il a été défini dans le cadre de la création de métriques d'évaluation de la démontabilité d'un produit. L'indicateur est construit sur quatre paramètres : (i) le temps de démontage, (ii) l'effort nécessaire pour le démontage, (iii) les types d'outils nécessaires et (iv) la viabilité de la réutilisation des pièces après démontage. Les paramètres sont évalués expérimentalement et agrégés en utilisant une matrice de corrélation tel que décrit dans (de Aguiar *et al.* 2017).

Nous avons décidé d'utiliser leur étude comme point de départ pour évaluer la démontabilité des fixations selon leur type. Cependant, pour que la valeur soit conforme à notre forme normalisée, une étape de conditionnement a dû être ajoutée, leur indicateur étant défini entre 1 et 4 (où 4 correspond à la pire note). Ainsi, l'échelle a été ramenée à 1, puis le sens de lecture a été inversé par soustraction à 1. 1 devient ainsi la meilleure note et 0 la pire. Les notes attribuées aux fixations sont ainsi présentés au tableau 43.

Type de fixation	de_f
Encliquetage	0,73
Scotch	0,67
Fermeoir	0,67
Rondelles de fixation	0,67
Vis	0,6
Écrou et boulon	0,6
Attache magnétique	0,6
Goupille	0,6
Velcro	0,53
Câble	0,53
Attaches en nylon	0,5
Clou	0,33
Colle	0,27
Rivet	0
Autre (hors la liste)	0,5

Tableau 43. Note de démontabilité attribuée aux fixations.

où de_f désigne la démontabilité de la fixation.

Une note globale caractérisant la démontabilité de toutes les fixations est nécessaire. Nous souhaitons que la variation de chaque indicateur (c.-à-d. la démontabilité de chaque fixation) intervienne de la même manière dans l'indice. C'est pourquoi, la fonction symétrique fondamentale, algébrique et homogène de degré 1 sous forme de moyenne a été retenue. L'indice de démontabilité de l'ensemble des fixations du produit est donc défini comme suit :

$$De_f = \frac{\sum_{i=1}^v de_f^i}{v}$$

avec

de_f^i : démontabilité de la $i^{ème}$ fixation

De_f : démontabilité de l'ensemble des fixations

v : nombre des fixations

Le tableau 44 montre les lignes directrices à appliquer lorsque le composant analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la démontabilité de ses fixations.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Fixations	Les fixations doivent être faciles à enlever	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière

Tableau 44. Lignes directrices associées au levier d'action démontabilité des fixations

En outre, la *remontabilité des fixations* suit la même logique que sa démontabilité. Les indicateurs développés ci-dessus seront ainsi utilisés pour analyser le remontage des fixations en les multipliant par un facteur de remontabilité (voir tableau 45).

Cas	frm_f
Le démontage est réversible et sans endommagement de la fixation	1
Le démontage est réversible mais avec endommagement de la fixation	0,5
Le démontage n'est pas réversible (c.-à-d. destructif)	0

Tableau 45. Facteur de remontabilité des fixations

2.3.2.2.3.8. Diversité des fixations

La diversité de fixations est un facteur qui contribue à la démontabilité du produit de façon inversement proportionnelle : plus il y a de fixations de natures différentes, plus l'opération de démontage est difficile.

De Aguiar *et al.* ont proposé l'indicateur *nombre de types de fixation* dans le cadre de la création des métriques d'évaluation de la démontabilité d'un produit (de Aguiar et al. 2017). L'indicateur est défini entre 1 et 4 (dont 4 correspond à la pire note). La note est attribuée selon l'un des quatre cas suivants : un type (1), deux types (2), trois types (3) et quatre types ou plus (4).

Nous n'avons pas retenu l'indicateur proposé par De Aguiar *et al.* car nous trouvons plus pertinent de profiter

de la relation inversement proportionnelle entre la démontabilité du produit et la diversité des fixations. Contrairement aux relations inversement proportionnelles abordés précédemment, ici nous avons besoin d'une fonction qui décroisse rapidement et que le meilleur score soit attribué lorsque nous n'avons qu'un seul type de fixation. C'est pourquoi, la fonction inverse est utilisée avec le nombre de types des fixations comme paramètre. L'indicateur de diversité des fixations est donc défini comme suit

$$Di_f = \frac{1}{n_{tf}}$$

avec

Di_f : diversité des fixations

n_{tf} : nombre de types des fixations

Le tableau 46 montre les lignes directrices à appliquer lorsque le composant analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la diversité de ses fixations.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Fixations	Minimiser le nombre total de différents types de fixations	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière

Tableau 46. Lignes directrices associées au levier d'action diversité des fixations

2.3.2.2.3.9. Diversité d'outils de (dé)montage

La diversité des outils de (dé)montage est aussi un facteur qui contribue à la démontabilité du produit de façon inversement proportionnelle. Plus il y aura d'outils différents pour le (dé)montage des fixations, plus l'opération de démontage sera complexe. De même que pour la diversité des fixations, la fonction inverse est utilisée, mais cette fois-ci avec le nombre de types d'outils de (dé)montage nécessaires comme facteur. L'indicateur de diversité d'outils de (dé)montage est donc défini par :

$$Di_{to} = \frac{1}{n_{to}}$$

avec

Di_{to} : diversité d'outils de (dé)montage

n_{to} : nombre de types d'outils de (dé)montage nécessaires

Le tableau 47 montre les lignes directrices à appliquer lorsque le composant analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la diversité d'outils de (dé)montage.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Fixations	Minimiser le nombre d'outils de (dé)montage des fixations nécessaires	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière

Tableau 47. Lignes directrices associées au levier d'action diversité d'outils de (dé)montage

2.3.2.2.3.10. Durabilité des fixations

La durabilité des fixations permet de prendre en compte les difficultés en fin de vie associées à un mauvais vieillissement du produit. En effet lors du démontage du produit, les fixations corrodées ou usées peuvent nuire l'opération et la rendre difficile. Par exemple, la corrosion est la dégradation naturelle d'un matériau en raison d'une réaction naturelle avec l'environnement (Office Québécois de la Langue Française s. d.). Cette problématique soulève une préoccupation importante chez les concepteurs (Fastenal 2009; Barrett 1990) car elle peut affaiblir les fixations métalliques et compromettre l'intégrité de la structure. En outre, les phénomènes d'usure vont concerner tous les phénomènes de frottement de perte de matière et de modification des cotes (Office Québécois de la Langue Française s. d.).

L'indicateur proposé cherche ainsi à évaluer si les fixations sont protégées contre la corrosion et l'usure. Il est présenté dans le tableau 49.

Cas	du_f
La fixation est protégée contre la corrosion et l'usure	1
La fixation est protégée contre la corrosion mais non contre l'usure	0,5
La fixation est protégée contre l'usure mais non contre la corrosion	0,5
La fixation n'est pas protégée contre la corrosion ni l'usure	0

Tableau 48. Indicateur de durabilité de la fixation

où du_f désigne la durabilité de la fixation.

Une note globale caractérisant la durabilité de toutes les fixations est nécessaire. Nous souhaitons que la variation de chaque indicateur (c.-à-d. la durabilité de chaque fixation) intervienne de la même manière dans l'indice. C'est pourquoi, la fonction symétrique fondamentale, algébrique et homogène de degré 1 sous forme de moyenne a été retenue. L'indice de durabilité de l'ensemble des fixations est donc défini comme suit :

$$Du_f = \frac{\sum_{i=1}^v du_f^i}{v}$$

avec

du_f^i : durabilité de la $i^{\text{ème}}$ fixation

Du_f : durabilité de l'ensemble des fixations

v : nombre des fixations

Le tableau 49 montre les lignes directrices à appliquer lorsque le composant analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la durabilité de ses fixations.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Fixations	Protéger les fixations contre la corrosion et l'usure	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière

Tableau 49. Lignes directrices associées au levier d'action durabilité

2.3.2.2.3.11. Modularité du produit

La modularité du produit est un facteur contribuant à la démontabilité du produit de façon directement proportionnelle. Plus le produit est modulaire, plus c'est bénéfique pour son démontage. En effet, la conception pour la modularité apparaît comme une réponse à la nécessité de rendre le démontage *intelligent* et avantageux (Tchertchian, Millet, et Pialot 2011).

L'évaluation de la modularité d'un produit est un sujet très abordé dans la littérature. Les études s'intéressent souvent à l'évaluation des interactions entre composants et modules du produit en s'appuyant sur des matrices de structure de conception (Jung et Simpson 2017; Umeda et al. 2008; Hölttä-Otto et de Weck 2007; Hölttä-Otto et al. 2012).

Les indicateurs de modularité identifiés dans la littérature n'ont pas été retenus pour notre démarche car ils ont été jugés trop complexes pour une utilisation en conception. Nous proposons donc un indicateur simple basé sur l'analyse fonctionnelle du produit :

$$M_p = \frac{n_m}{n_{fp}}$$

avec

M_p : modularité du produit

n_{fp} : nombre de fonctions du produit

n_m : nombre de modules

Le tableau 50 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la modularité du produit.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Produit	Rendre le produit aussi modulaire que possible (avec séparation des fonctions)	Valorisation fonctionnelle
	Rendre le produit aussi modulaire que possible (avec séparation des matériaux)	Valorisation matière

Tableau 50. Lignes directrices associées au levier d'action modularité du produit

Il faut noter que la structure modulaire appropriée diffère selon la voie de traitement visée : par exemple, une structure modulaire basée sur les types de matériaux est préférée lors que le recyclage est envisagé, alors qu'une structure basée sur les fonctions qui seront obsolètes sera préférée pour la montée en gamme (Umeda et al. 2008). L'indicateur proposé permet d'évaluer la modularité vis-à-vis d'une valorisation fonctionnelle, mais pas vis-à-vis d'une valorisation matière.

2.3.2.2.3.12. Repérabilité des composant

La repérabilité des composants (c.-à-d. la capacité des composants à être repérés) est un facteur qui contribue à la démontabilité du produit de façon directement proportionnelle. En effet, plus les composants sont faciles à retrouver, plus l'opération de démontage en bénéficie.

L'indicateur repérabilité du composant est présenté dans le tableau 51. Il a été construit à partir d'une abstraction de l'indicateur de repérabilité de la fixation proposé dans le paragraphe suivant (voir

§ 2.3.2.2.3.13).

Cas	rp_c
Le composant est 100 % visible	1
Le composant est obstrué mais visible à 50 % ou plus	0,5
Le composant est obstrué et visible à moins de 50 %	0,2
Le composant n'est pas visible	0

Tableau 51. Indicateur de repérabilité des composants

où rp_c désigne la repérabilité du composant.

Une note globale caractérisant la repérabilité de tous les composants est nécessaire. Nous souhaitons que la variation de chaque indicateur (c.-à-d. la repérabilité de chaque composant) intervienne de la même manière dans l'indice. C'est pourquoi, la fonction symétrique fondamentale, algébrique et homogène de degré 1 sous forme de moyenne a été retenue. L'indice de repérabilité des composants du produit est donc défini comme suit :

$$Rp_c = \frac{\sum_{i=1}^m rp_c^i}{m}$$

avec

rp_c^i : repérabilité du $i^{\text{ème}}$ composant

Rp_c : repérabilité des composants

m : nombre des composants

Le tableau 52 montre les lignes directrices à appliquer lorsque le composant analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de sa repérabilité.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Composants	Les consommables ainsi que les composants avec une valeur économique élevé ou ceux qui sont facilement endommageables doivent être facilement identifiables	Valorisation fonctionnelle
	Les composants contenant des matériaux non recyclables, non compatibles, toxiques, précieux, rares et critiques doivent être facilement identifiables	Valorisation matière

Tableau 52. Lignes directrices associées au levier d'action repérabilité des composants

2.3.2.2.3.13. Repérabilité des fixations

La *repérabilité* des fixations (c.-à-d. la capacité des fixations à être repérées) est un facteur qui contribue à la démontabilité du produit de façon directement proportionnelle. Plus les fixations sont facilement repérés, plus l'opération de démontage est facilitée. D'autres termes tels que la *visibilité* ou même l'*identifiabilité* (capacité à être identifié) sont aussi utilisés dans la littérature. À titre d'exemples,

- Justel Lozano précise que la visibilité d'une fixation est fonction de plusieurs facteurs tels que la surface, la forme, et le matériau constitutif (Justel Lozano 2008). Dans son étude, elle est évaluée sur la base du temps d'identification ;

- Vanegas *et al.* ont proposé un indicateur d'identifiabilité des vis dans le cadre de l'évaluation de la facilité de démontage des produits (Vanegas et al. 2018). Pour eux, seule la surface visible (lorsque l'on regarde dans le sens de la fixation) est prise en compte pour l'évaluation. Ils définissent uniquement niveaux de visibilité : visible (surface visible > 0,05 mm²) et cachée (surface visible < 0,05 mm²). L'indicateur peut ainsi prendre la valeur de 0 ou de 1 (où 1 correspond à une surface visible).

L'indicateur de repérabilité des fixations ici proposé est construit sur le même principe que celui de Vanegas *et al.* (c.-à-d. la surface visible). Cependant, les fixations ayant des formes et des tailles variables, il a été décidé d'utiliser plutôt le pourcentage de surface visible (et non une valeur précise comme originalement proposé). L'indicateur ainsi proposé est présenté dans le tableau 53.

Cas	rp_f
Les fixations sont 100 % visibles	1
Les fixations sont obstruées mais visibles à 50 % ou plus	0,5
Les fixations sont obstruées et visibles à moins de 50 %	0,2
Les fixations ne sont pas visibles	0

Tableau 53. Indicateur de repérabilité de la fixation

où rp_f désigne la repérabilité de la fixation.

Une note globale caractérisant la repérabilité de toutes les fixations est nécessaire. Nous souhaitons que la variation de chaque indicateur (c.-à-d. la repérabilité de chaque fixation) intervienne de la même manière dans l'indice. C'est pourquoi, la fonction symétrique fondamentale, algébrique et homogène de degré 1 sous forme de moyenne a été retenue. L'indice de repérabilité des fixations du produit est donc défini comme suit :

$$Rp_f = \frac{\sum_{i=1}^v rp_f^i}{v}$$

avec

rp_f^i : repérabilité de la $i^{\text{ème}}$ fixation

Rp_f : repérabilité des fixations

v : nombre des fixations

Le tableau 54 montre les lignes directrices à appliquer lorsque le composant analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la repérabilité de ses fixations.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Fixations	Les fixations doivent être facilement repérables	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière

Tableau 54. Lignes directrices associées au levier d'action repérabilité des fixations

2.3.2.2.3.14. Standardisation d'outils de (dé)montage

Le levier d'action de standardisation des fixations a pour but de simplifier le démontage des composants en privilégiant l'utilisation des fixations dont l'outil de démontage nécessaire n'est pas spécifique. Dans les travaux de Alonso Movilla, le paramètre d'outils de démontage a été pris en compte pour la création d'un indice de liaison (Alonso Movilla et al. 2013). Nous avons décidé d'utiliser cet indicateur car il est simple et il privilégie l'utilisation des fixations pour lesquels aucun outil n'est nécessaire ; il correspond en outre à notre forme normalisée d'indicateurs. L'indicateur de standardisation de la fixation retenu pour notre démarche est présenté dans le tableau 55.

Cas	S_f
La fixation n'a pas besoin d'outils de démontage	1
La fixation a besoin uniquement d'outils standards	0,8
La fixation a besoin d'outils spécifiques	0

Tableau 55. Indicateur de standardisation de la fixation

où S_f désigne la standardisation de la fixation.

Une note globale caractérisant la standardisation de toutes les fixations est nécessaire. Nous souhaitons que la variation de chaque indicateur (c.-à-d. la standardisation de chaque fixation) intervienne de la même manière dans l'indice. C'est pourquoi, la fonction symétrique fondamentale, algébrique et homogène de degré 1 sous forme de moyenne a été retenue. L'indice de standardisation des fixations du produit est donc défini comme suit :

$$S_f = \frac{\sum_{i=1}^v S_f^i}{v}$$

avec

S_f^i : standardisation de la $i^{ème}$ fixation

S_f : standardisation des fixations

v : nombre des fixations

Le tableau 56 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la standardisation de ses composants et ses matériaux.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Fixations	Favoriser l'utilisation d'outils de démontage standards	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière

Tableau 56. Lignes directrices associées au levier d'action standardisation des fixations

2.3.2.2.4. Inflammabilité des matériaux

Au sens large, l'inflammabilité est l'aptitude d'un matériau ou d'un produit à brûler et à soutenir la

combustion (Office Québécois de la Langue Française s. d.). Dans le cadre de notre étude, ce levier d'action cherche à vérifier si le matériau concerné n'induera pas de conséquences négatives lors de la captation d'énergie associée à une mauvaise incinération. Pour s'assurer que les matières destinées à l'incinération puissent bien brûler, le pourcentage de matière inflammable à 800 °C doit être vérifié car les fours utilisés pour l'incinération montent généralement à cette température (Pôle éco-conception 2015). L'indicateur d'inflammabilité des matériaux est défini dans le tableau 57.

Cas	In_c
Le matériau est inflammable à 800 °C	1
Le matériau n'est pas inflammable à 800 °C	0
Il n'y a pas d'informations sur l'inflammabilité du matériau	0,5

Tableau 57. Indicateur d'inflammabilité des matériaux

où In_c désigne l'inflammabilité du composant.

L'indicateur proposé respecte bien la forme normalisée définie pour l'ensemble d'indicateurs. Le tableau 58 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de l'inflammabilité de ses matériaux et ses substances.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Matériaux	Augmenter le nombre des matériaux et substances inflammables à 800°C	Valorisation énergétique Élimination

Tableau 58. Lignes directrices associées au levier d'action inflammabilité

2.3.2.2.5. Potentiel méthanogène des matériaux

Le potentiel méthanogène est l'un des principaux paramètres qui détermine l'équilibre de la recette du digesteur (ADEME 2017d). Il est défini comme la quantité maximale de méthane pouvant être obtenue par digestion anaérobie d'une biomasse donnée (Office Québécois de la Langue Française s. d.).

Dans le cadre de notre étude, le levier d'action de potentiel méthanogène cherche à vérifier si le potentiel du matériau concerné correspond au dimensionnement des installations dans lequel il sera méthanisé. L'indicateur de pouvoir calorifique est défini dans le tableau 59.

Cas	Pm_m
Le potentiel méthanogène du matériau correspond au dimensionnement des installations de méthanisation	1
Le potentiel méthanogène du matériau ne correspond pas au dimensionnement des installations de méthanisation	0
Il n'y a pas d'informations sur le potentiel méthanogène du matériau ou sur le dimensionnement des installations	0,5

Tableau 59. Indicateur de potentiel méthanogène des matériaux

où Pm_m désigne le potentiel méthanogène du matériau.

L'indicateur proposé respecte bien la forme normalisée définie pour l'ensemble d'indicateurs. Le tableau 60 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis du potentiel méthanogène de ses matériaux.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Matériaux	Choisir des matériaux et substances à haut potentiel méthanogène	Valorisation énergétique

Tableau 60. Lignes directrices associées au levier d'action potentiel méthanogène

2.3.2.2.6. Pouvoir calorifique des matériaux

Le pouvoir calorifique est une propriété des combustibles indiquant la quantité (théorique) d'énergie contenue dans un combustible. Il est défini à partir de la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une unité de combustible (Office Québécois de la Langue Française s. d.).

Les installations d'incinération sont généralement dimensionnées pour un certain PCI (pouvoir calorifique inférieur). Par exemple, les incinérateurs d'ordures ménagères admettent des déchets avec un PCI faible mais les incinérateurs de déchets industriels ont besoin d'un PCI fort. (Pôle éco-conception 2015) Dans le cadre de notre étude, le levier d'action de pouvoir calorifique cherche à vérifier si le PCI du matériau concerné est en accord avec le dimensionnement des installations dans lequel il sera incinéré. L'indicateur de pouvoir calorifique est défini dans le tableau 61.

Cas	Pc_m
Le PCI du matériau correspond au dimensionnement des installations d'incinération	1
Le PCI du matériau ne correspond pas au dimensionnement des installations d'incinération	0
Il n'y a pas d'informations sur le PCI du matériau	0,5

Tableau 61. Indicateur de pouvoir calorifique des matériaux

où Pc_m désigne le pouvoir calorifique du matériau.

L'indicateur proposé respecte bien la forme normalisée définie pour l'ensemble d'indicateurs. Le tableau 62 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis du pouvoir calorifique de ses matériaux.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Matériaux	Choisir des matériaux et substances à haute énergie et vérifier leur adéquation aux performances de l'incinérateur	Valorisation énergétique Élimination

Tableau 62. Lignes directrices associées au levier d'action pouvoir calorifique

2.3.2.2.7. Rareté (criticité) des matériaux

Les matériaux considérés comme rares sont tous les métaux et minéraux présents en petites quantités dans

la nature, et ceux dont les gisements sont particulièrement difficiles et coûteux à exploiter. La demande de plus en plus forte en ressources dont la disponibilité est limitée peut entraîner une augmentation des coûts lorsqu'elles deviennent de moins en moins présentes, voire vouées à un épuisement total.

Le levier d'action *rareté des matériaux* concerne donc des problématiques liées à leur difficulté d'approvisionnement. Dans ce cadre, la *criticité des ressources* désigne habituellement le risque de perturbation de l'approvisionnement en ressources minérales, pour des raisons économiques et géopolitiques (Mancini, Benini, et Sala 2018). C'est pourquoi nous avons décidé d'évaluer le levier à partir de la criticité des matériaux.

La Commission Européenne a publié une liste de 27 matières premières (sur 78 étudiées) qui ont été classées comme critiques (Commission Européenne 2017). Pour l'UE, deux paramètres principaux sont utilisés pour déterminer la criticité d'un matériau : son importance économique et le risque d'approvisionnement (Baranzelli et al. 2017; Blengini et al. 2017). La liste a été établie sur la base des matières premières qui atteignent ou dépassent les seuils des deux paramètres définis par la Commission Européenne.

L'indicateur de criticité retenu ici utilise une base de données ou des informations définies précédemment comme point de départ. L'indicateur peut ainsi être défini de façon très simple : si le matériau est identifié comme critique, la pire note doit lui être attribuée, la meilleure note dans le cas contraire. Lorsqu'il n'y a pas d'information disponible, une note intermédiaire est donnée. L'indicateur proposé est présenté dans le tableau 63.

Cas	Ra_m
Le matériau n'est pas identifié comme critique	1
Le matériau est identifié comme critique	0
Il n'y a pas d'informations sur la criticité du matériau	0,5

Tableau 63. Indicateur de rareté (criticité) des matériaux

où Ra_m désigne la rareté (criticité) du matériau.

Le tableau 64 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la criticité de ses matériaux.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Matériaux	Privilégier l'utilisation des matériaux abondants au lieu de matériaux rares	Valorisation énergétique Élimination

Tableau 64. Lignes directrices associées au levier d'action rareté

2.3.2.2.8. Recyclabilité du produit

Tel qu'évoqué précédemment, trois leviers d'action associés à la recyclabilité du produit ont été identifiés. Le classement en est présenté à la figure 59.

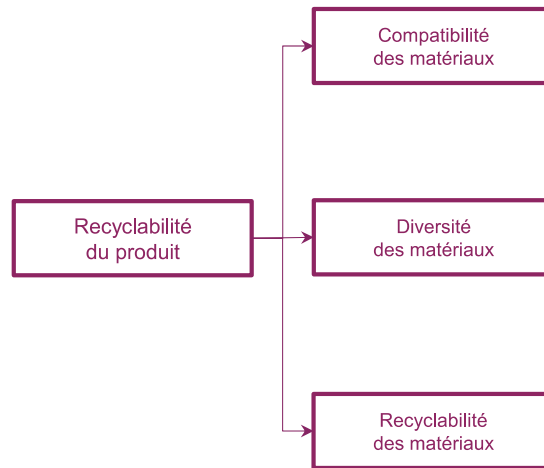


Figure 59. Classement des leviers d'action liés à la recyclabilité

La recyclabilité d'un produit est ainsi fonction de trois paramètres : la compatibilité, la diversité et la recyclabilité de ses matériaux (voir figure 59). Un indice permettant d'agréger les indices et indicateurs associés à ces paramètres est donc nécessaire. Nous souhaitons que la variation de chaque indicateur intervienne de la même manière dans l'indice. C'est pourquoi, la fonction symétrique fondamentale, algébrique et homogène de degré 1 sous forme de moyenne a été retenue. L'indice de recyclabilité du produit est donc défini comme suit :

$$R_p = \frac{C_m + D_m + R_m}{3}$$

avec

- C_m : compatibilité des matériaux
- D_m : diversité des matériaux
- R_m : recyclabilité des matériaux
- R_p : recyclabilité du produit

2.3.2.2.8.1. Compatibilité des matériaux

Le levier d'action compatibilité des matériaux porte sur leur compatibilité chimique en recyclage. Deux matériaux sont ainsi incompatibles si les propriétés (mécaniques ou autres) du matériau à recycler diminuent lorsque les deux sont recyclés ensemble. Quelques indicateurs de compatibilité des matériaux ont été identifiés dans la littérature :

- Ishii et al. (Ishii, Eubanks, et Di Marco 1994) proposent d'évaluer la compatibilité des matériaux d'une façon semi-qualitative. L'indicateur ainsi proposé définit six niveaux de compatibilité : très compatibles (1), compatibles (0,8), en compatibilité dans une certaine mesure (0,6), incompatibles (0,2), dangereux (0) et pas d'information (0,5). La note attribuée est bien contenue dans l'intervalle [0;1] ;
- Qian et al. (Qian, Yu, et Zhang 2001) proposent d'évaluer la compatibilité des matériaux (thermoplastiques) en utilisant des matrices de compatibilité pour visualiser l'information facilement. La compatibilité est divisée en quatre niveaux : plutôt compatibles, plus ou moins compatibles, compatibilité limitée et non compatibles. Ici, la valeur de l'indicateur n'est pas chiffrée, mais un graphe indique par zones le degré de compatibilité ;

- Pahl *et al.* (Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007) proposent un indicateur similaire à celui de Qian *et al.* La compatibilité de matériaux (plastiques) est classée sur quatre niveaux : compatibles, à compatibilité limitée, compatibles en petites quantités et non compatibles. De même que pour l'indicateur de Qian *et al.*, la valeur fournie par cet indicateur est graphique est non précisément chiffrée ;
- De Aguiar et al. (de Aguiar et al. 2017) proposent un indice de compatibilité similaire aux précédents. Ils proposent de classer la compatibilité des matériaux en quatre niveaux : même matériaux (1), matériaux compatibles (2), faible compatibilité des matériaux (3) et matériaux incompatibles (4). L'indicateur est donc normalisé entre 1 et 4.

Tous les indicateurs identifiés dans la littérature donnent une note (semi-quantitative) de la compatibilité entre deux matériaux. Ils pourraient tous (avec des modifications mineures) être utilisés dans notre démarche. Cependant, un nouvel indicateur inspiré des meilleurs indicateurs identifiés est proposé. Ainsi, l'indicateur de compatibilité de Pahl *et al.* a été retenu comme point de départ pour la construction du nôtre car il a été jugé le plus pertinent (en raison de son classement). Les modifications apportées sont :

- d'une part, les valeurs de compatibilité sont exprimées de façon similaire à ceux proposés par Ishii *et al.* pour que la valeur fournie soit un nombre (et non un graphique). La valeur est ainsi contenue dans l'intervalle [0;1] et la logique d'interprétation reste la même que celle adoptée pour l'ensemble d'indicateurs (c.-à-d. 0 correspond à la pire valeur et 1 à la meilleure) ;
- d'autre part, le cas particulier où le concepteur ne dispose pas d'information, proposé par Ishii *et al.*, a été ajouté aux cas proposés par Pahl *et al.*

L'indicateur de compatibilité entre deux matériaux est défini dans le tableau 65.

Cas	c_m
Compatibles	1
Compatibles dans des quantités limitées	0,5
Compatibles dans des petites quantités	0,25
Incompatibles	0
Pas d'information sur la compatibilité	0,5

Tableau 65. Indicateur de compatibilité des matériaux

où c_m désigne la compatibilité entre matériaux.

Dans notre démarche, la compatibilité entre matériaux ne s'arrête pas à la comparaison de deux matériaux. En effet, la compatibilité des matériaux doit être évaluée pour un module ou pour une pièce multi-matériaux. La compatibilité doit donc être estimée par rapport à tous les autres matériaux contenus dans le module ou la pièce en question. Cependant, il manque un indice capable d'évaluer la compatibilité d'un matériau par rapport à tous les autres (avec lesquels il serait recyclé). Une agrégation des compatibilités est donc nécessaire. Nous souhaitons que la variation de chaque indicateur (c.-à-d. la compatibilité entre chaque couple de matériaux) intervienne de la même manière dans l'indice. C'est pourquoi, la fonction symétrique fondamentale, algébrique et homogène de degré 1 sous forme de moyenne a été retenue. L'indice de compatibilité d'un matériau est donc défini comme suit :

$$C_m^i = \frac{\sum_{j=1}^u C_m^{i,j}}{u}$$

avec

- C_m^i : compatibilité du $i^{\text{ème}}$ matériau
- $C_m^{i,j}$: compatibilité entre le $i^{\text{ème}}$ et le $j^{\text{ème}}$ matériau
- u : nombre de matériaux

Nous avons ensuite besoins de calculer une note globale caractérisant la compatibilité de tous matériaux du produit (c.-à-d. l'agrégation de l'ensemble des indicateurs de compatibilité de tous les matériaux de l'artéfact). Cet indice est construit sur le même principe que les indices qu'il agrège, et s'exprime comme suit :

$$C_m = \frac{\sum_{i=1}^u C_m^i}{u}$$

avec C_m : compatibilité des matériaux

L'indice de compatibilité des matériaux du produit proposé respecte bien la forme normalisée définie pour l'ensemble d'indicateurs. Le tableau 66 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la compatibilité de ses matériaux.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Matériaux	Utiliser des matériaux compatibles (qui peuvent être recyclés ensemble) dans le produit ou le sous-ensemble	Valorisation matière
	Utiliser des fixations faites d'un matériau compatible avec les pièces assemblées	Valorisation matière

Tableau 66. Lignes directrices associées au levier d'action compatibilité des matériaux

2.3.2.2.8.2. Diversité des matériaux

Nous définissons la diversité des matériaux comme étant la variété de matériaux utilisée dans un produit. La diversité contribue de façon inversement proportionnelle à la recyclabilité du produit. Plus elle est importante (c.-à-d. plus il y a de matériaux différents), plus le recyclage est difficile.

Il est important de préciser que nous ne connaissons pas l'effet précis de cette diversité de matériaux sur la recyclabilité du produit. Cependant, de façon très générale, nous attendons le comportement suivant :

- plus la quantité des matériaux est grande, plus il est difficile de recycler le produit ;
- plus la concentration d'un matériau est importante, plus ce matériau est simple à recycler.

Notre indicateur de diversité des matériaux doit donc être défini en fonction de deux paramètres : le nombre de matériaux et leur concentration dans le produit.

Une recherche bibliographique sur les indicateurs de diversité des matériaux a été menée. Elle montre que dans la plupart d'articles, il n'est pas précisé comment cette diversité est mesurée. Il est néanmoins sous-entendu qu'il s'agit de la quantité de matériaux différents utilisés dans un produit. Seul deux indicateurs de diversité de matériaux ont ainsi été identifiés :

- Dostatni *et al.* (Dostatni et al. 2016) mesurent la diversité des matériaux à partir de l'indicateur *pourcentage de diversité des matériaux* dont la valeur est ensuite cadre dans une valeur d'entre 0,5 et 5 (choix fait par les auteurs pour homogénéiser leurs indicateurs). L'indicateur de pourcentage de diversité des matériaux est fonction du nombre d'occurrences (c.-à-d. le nombre de pièces faites de ce matériau) du matériau le plus présent dans le produit, et du nombre d'occurrences de tous les matériaux ;
- Rzeźnik *et al.* (Rzeźnik, Rybacki, et Molińska 2008) mesurent l'hétérogénéité des matériaux (c.-à-d. la diversité des matériaux) d'une machine à partir de son d'entropie d'information.

L'indicateur proposé par Dostatni *et al.* ne correspond pas aux besoins. Le problème principal est que la masse de ces matériaux n'est pas prise en compte. C'est en effet un paramètre important. Si par exemple le produit est élaboré à partir d'une grande variété de matériaux dont la plupart sont en faible quantité, et qu'une de ses pièces a pour masse plus de 90 % du tout, on pourrait assimiler le produit à un artéfact mono-matériau. Cet indicateur n'est pas capable de refléter cette réalité.

En revanche, l'indicateur proposé par Rzeźnik *et al.* correspond bien au comportement attendu pour un indicateur de diversité des matériaux (en termes du nombre et de concentration) :

- l'indicateur est sensible à la diversité des matériaux : plus le produit contient de matériaux différents, plus la valeur de l'entropie augmente ;
- l'indicateur est sensible à la concentration des matériaux : plus la concentration d'un matériau est importante, plus la valeur de la diversité est faible.

Un conditionnement de cet indicateur a cependant été nécessaire pour homogénéiser sa valeur avec celle de nos indicateurs. Comme la diversité des matériaux contribue à la recyclabilité du produit de façon inversement proportionnelle, la fonction inverse a été utilisée. De plus, on sait que les valeurs d'entropie démarrent à 0 (p. ex. un produit mono-matériau pour lequel il n'y a pas de désordre) et augmentent en fonction du nombre et de la concentration des matériaux. C'est pourquoi, un coefficient est ajouté au dénominateur. L'indicateur proposé est alors défini comme par :

$$D_m = \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^u c_i \log_2 c_i} \quad \text{avec } \sum c_i = 1$$

avec

D_m : diversité des matériaux

c_i : concentration du $i^{\text{ème}}$ matériau

u : nombre de matériaux

Le tableau 67 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la diversité de ses matériaux.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Matériaux	Minimiser le nombre de différents types de matériaux	Valorisation matière
	Éviter le mélange des matériaux dans les assemblages	Valorisation matière
	Stratégie monomatériau. Privilégier un seul matériau par produit ou sous-ensemble	Valorisation matière

Tableau 67. Lignes directrices associées au levier d'action diversité des matériaux

2.3.2.2.8.3. Recyclabilité des matériaux (efficacité du traitement)

Le levier d'action recyclabilité des matériaux est une mesure de performance de la filière qui concerne uniquement l'efficacité du recyclage. L'indicateur ici proposé est défini à partir des deux facteurs utilisés lors de l'évaluation de la valorisabilité d'un produit et plus précisément, lors du calcul de l'efficacité potentielle de la valorisation matière. Il est défini par :

$$r_m = \tau_r \tau_p$$

avec

- r_m : recyclabilité du matériau
- τ_r : taux de recyclage du matériau
- τ_p : taux de pureté du matériau

Le taux de recyclage utilisé ci-dessus est calculé de la même manière que l'indicateur réglementaire du taux de recyclage et de réutilisation (défini au Chapitre 2, § 3.1.2.2.1). La seule différence est évidemment que seule la fraction recyclée est prise en compte dans le calcul. Le taux de recyclage d'un matériau est donc défini comme suit :

$$\tau_r = \frac{m_{rf}}{m_{yf}}$$

avec

- m_{rf} : masse du matériau recyclée par la filière
- m_{yf} : masse du matériau traitée par la filière
- u : nombre de matériaux

Le taux de pureté a enfin pour objectif d'évaluer le degré la préservation de qualité des matériaux recyclés. Grimaud a défini la qualité des extrants comme la grandeur exprimant la capacité d'une technologie de tri à extraire d'un flux de déchets mélangés, un flux de matière correspondant à une typologie définie (Grimaud 2019). Il a exprimé cette grandeur comme le rapport entre la quantité de matière présente dans le flux de sortie correspondant à cette typologie, et la quantité totale de déchets constituant la fraction sortante. L'indicateur de pureté du matériau proposé par Grimaud a été utilisé comme base pour notre étude. Toutefois ici, la fraction prise en compte est celle qui sort du recyclage et non celle issue du tri. L'indicateur est défini comme suit :

$$\tau_p = \frac{m_m}{m_m + m_{am}}$$

avec

- m_m : masse du matériau considéré dans la fraction recyclée
- m_{am} : masse d'autres matériaux dans la fraction recyclée

Une note globale caractérisant la recyclabilité de tous les matériaux du produit est nécessaire. Nous souhaitons que la variation de chaque indicateur (c.-à-d. la recyclabilité de chaque matériau) intervienne de la même manière dans l'indice. C'est pourquoi, la fonction symétrique fondamentale, algébrique et homogène de degré 1 sous forme de moyenne a été retenue. L'indice de recyclabilité des matériaux est donc défini comme suit :

$$R_m = \frac{\sum_{i=1}^u r_m^i}{u}$$

avec

- r_m^i : recyclabilité du $i^{\text{ème}}$ matériau
- R_m : recyclabilité des matériaux

L'indice de recyclabilité des matériaux de l'artéfact proposé respecte bien la forme normalisée définie pour l'ensemble d'indicateurs. Le tableau 68 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la recyclabilité de ses matériaux.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Matériaux	Utiliser des matériaux recyclables	Valorisation matière
	Choisir des matériaux qui peuvent récupérer facilement leurs propriétés originelles après le recyclage	Valorisation matière
	Privilégier l'utilisation des matériaux et substances recyclables pour minimiser la part résiduelle arrivant à cette voie de valorisation	Valorisation énergétique

Tableau 68. Lignes directrices associées au levier d'action recyclabilité des matériaux

2.3.2.2.9. Réutilisabilité, capacité à monter en gamme et réaffectabilité du produit

La réutilisabilité est généralement évaluée à partir du taux de réutilisabilité qui exprime la capacité (potentielle) d'un produit à être réutilisé (voir Chapitre 3, § 2.2.4).

Le taux de réutilisabilité (comme tous les taux de valorisabilité) cherche à montrer comment le produit sera intégré par sa filière de traitement en fin de vie. Le problème de cet indicateur est qu'il n'exprime pas la capacité réelle du produit à être réutilisé. Pour mieux comprendre, analysons le cas du Fairphone® qui est un téléphone conçu pour ça. Si on calcule son taux de réutilisabilité (voir Chapitre 5, § 4.3), on constate que le taux de réutilisabilité ne reflète pas du tout cette caractéristique. Ce résultat s'explique par le fait que la *famille des produits* à laquelle le téléphone appartient n'est quasiment pas réutilisée ; le taux de réutilisation de la filière (pour cette *famille*) est donc faible. On observe alors qu'une analyse avec le taux de réutilisabilité pourrait mener à des conclusions erronées sur la réutilisabilité du produit.

Un nouvel indicateur permettant d'évaluer la réutilisabilité du produit-même (c.-à-d. sans la prise en compte de la filière) semble ainsi nécessaire. Pour résoudre ce point, nous introduisons ici le concept de *masse conceptuellement réutilisable*. Il concerne la masse des artéfacts dont la durée de vie estimée en conception est au minimum le double de la durée de vie moyenne du produit et/ou des artéfacts disponibles à la vente sous forme de pièces de rechange. Ce nouveau terme ne doit pas être confondu avec celui de masse *potentiellement* réutilisable. En prenant comme base le taux de réutilisabilité mais en utilisant ce nouveau concept de masse *conceptuellement* valorisable, on définit le *taux de réutilisabilité conceptuelle* comme suit :

$$\tau'_{ruc} = \frac{m_{pruc}}{m_p} \quad \text{où } m_{pruc} = \sum_{i=1}^m m_{aruc}^i$$

avec

- τ'_{ruc} : taux de réutilisabilité conceptuelle

Chapitre 4

Méthodologie d'évaluation et d'aide à la décision en conception

m_{pruc} : masse du produit conceptuellement réutilisable

m_p : masse totale du produit

m_{aruc}^i : masse du $i^{\text{ème}}$ artéfact conceptuellement réutilisable

m : nombre d'artéfacts du produit conceptuellement réutilisables

i : numéro d'artéfact ($1 \leq i \leq m$)

Le tableau 69 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la réutilisabilité du produit.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Produit	Concevoir le produit pour multiples usages	Valorisation fonctionnelle

Tableau 69. Lignes directrices associées au levier d'action réutilisabilité

Parmi les indicateurs de valorisabilité identifiés dans la littérature, aucun indicateur de capacité à monter en gamme n'a été trouvé (voir Chapitre 3 § 2.2.4). Cependant, le même principe de construction que celui du taux de réutilisabilité conceptuelle peut être utilisé. En le prenant comme base mais en utilisant la part massique pouvant conceptuellement monter en gamme, on définit le *taux de capacité conceptuelle à monter en gamme* comme suit :

$$\tau'_{mgc} = \frac{m_{pmgc}}{m_p} \quad \text{où} \quad m_{pmgc} = \sum_{i=1}^m m_{amgc}^i$$

avec

i : numéro d'artéfact ($1 \leq i \leq m$)

m_{pmgc} : masse du produit pouvant conceptuellement monter en gamme

m_p : masse totale du produit

m_{amgc}^i : masse du $i^{\text{ème}}$ artéfact pouvant conceptuellement monter en gamme

m : nombre d'artéfacts du produit pouvant conceptuellement monter en gamme

τ'_{mgc} : taux de capacité conceptuelle à monter en gamme

Le tableau 70 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la capacité à monter en gamme du produit.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Produit	Permettre et faciliter la montée en gamme du produit (hardware et software)	Valorisation fonctionnelle

Tableau 70. Lignes directrices associées au levier d'action capacité à monter en gamme

Parmi les indicateurs de valorisabilité identifiés dans la littérature, aucun indicateur de réaffectabilité n'a été trouvé (voir Chapitre 3, § 2.2.4). Cependant, le même principe de construction que celui du taux de réutilisabilité conceptuelle peut être utilisé. En le prenant comme base mais en utilisant la masse

conceptuellement réaffectable, on définit le *taux de réaffectabilité conceptuelle* par :

$$\tau'_{rac} = \frac{m_{prac}}{m_p} \quad \text{où } m_{prac} = \sum_{i=1}^m m_{arac}^i$$

avec

- i : numéro d'artéfact ($1 \leq i \leq m$)
- m : nombre d'artéfacts du produit conceptuellement réaffectables
- m_{arac}^i : masse du $i^{ème}$ artéfact conceptuellement ré-affectable
- m_p : masse totale du produit
- m_{prac} : masse du produit conceptuellement ré-affectable
- τ'_{rac} : taux de réaffectabilité conceptuelle

Le tableau 71 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la réaffectabilité du produit.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Produit	Concevoir un produit multifonctionnel et configurable dynamiquement	Valorisation fonctionnelle

Tableau 71. Lignes directrices associées au levier d'action réaffectabilité

On constate que les trois indicateurs définis précédemment respectent ce qui a été défini pour l'ensemble des indicateurs :

- leur valeur est contenue dans l'intervalle de 0 et 1 ;
- la valeur de 1 correspond à la meilleure note et 0 à la pire

2.3.2.2.10. Standardisation des composants

Le levier d'action de standardisation a pour objectif de simplifier le remplacement de certains composants en utilisant des pièces standard. L'indicateur de standardisation des composants proposé pour notre démarche est présenté dans le tableau 72.

Cas	S_c
Le produit contient uniquement de composants standard	1
Le produit contient des composants standards mais aussi des composants non standards	0,5
Le produit ne contient aucun composant standard	0

Tableau 72. Indicateur de standardisation des composants

où S_c désigne la standardisation des composants.

Le tableau 73 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la standardisation de ses composants et de ses matériaux.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Composants	Utiliser des composants standards ou les concevoir selon les normes	Valorisation fonctionnelle

Tableau 73. Lignes directrices associées au levier d'action standardisation des composants

2.3.2.2.11. Toxicité des matériaux

La toxicité peut être définie comme le potentiel ou la capacité inhérente d'un matériau ou d'une substance chimique de causer des effets nocifs sur les organismes vivants (Office Québécois de la Langue Française s. d.). Dans le cadre de notre étude, le levier d'action toxicité est lié à la limitation de l'utilisation de certaines substances toxiques dans les produits. L'indicateur associé doit donc vérifier si les matériaux et substances concernés respectent les concentrations maximales tolérées. L'indicateur de toxicité des matériaux proposé est défini dans le tableau 74.

Cas	to
Le matériau ou la substance n'est pas considéré comme toxique	1
Le matériau ou la substance est considéré comme toxique mais respecte la concentration maximale tolérée	0,5
Le matériau ou la substance est considéré comme toxique et dépasse la concentration maximale tolérée	0
Il n'y a pas d'informations sur la toxicité du matériau ou sur la concentration maximale tolérée	0,5

Tableau 74. Indicateur de toxicité des matériaux

où to désigne la toxicité du matériau ou de la substance.

Une note globale caractérisant la toxicité de tous les matériaux est nécessaire. Contrairement aux autres agrégations, nous souhaitons que l'indice de toxicité soit capable d'identifier quand l'un des matériaux contenus dans le produit est toxique. C'est pourquoi, la fonction symétrique fondamentale, algébrique et homogène de degré n est sensible à la valeur la plus faible et correspond ainsi à nos attentes. L'indice de toxicité des matériaux est donc défini comme suit :

$$To_f = \prod_{i=1}^u to_f^i$$

avec

To_f : toxicité des matériaux ou des substances

to_f^i : toxicité du $i^{ème}$ matériau ou de la $i^{ème}$ substance

u : nombre de matériaux

L'indicateur proposé respecte bien la forme normalisée définie pour l'ensemble d'indicateurs. Le tableau 75 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la toxicité de ses matériaux.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Matériaux	Éviter ou réduire l'utilisation des substances, matériaux ou composants nocifs pour l'homme ou pour l'environnement	Valorisation matière
	Éviter les matériaux et substances qui émettent des substances toxiques lors de l'incinération et la méthanisation	Valorisation énergétique
	Éviter les matériaux et substances qui émettent des substances toxiques lors de l'incinération et le stockage	Élimination

Tableau 75. Lignes directrices associées au levier d'action toxicité

2.3.2.2.12. Utilisation des matières recyclés

La norme ISO 14021 définit le contenu recyclé comme la proportion en masse, de matériau recyclé dans un produit ou un emballage (ISO 2016).

Un indicateur d'utilisation de matières recyclées a été identifié parmi les indicateurs de valorisabilité trouvés dans la littérature (voir Chapitre 3, § 2.2.4). Il s'agit du taux de contenu recyclé proposé par la méthode REAPro (Ardenne et Mathieux 2014). L'indicateur a été retenu pour notre démarche car il correspond bien à notre levier d'action. En revanche, nous avons décidé d'ignorer le facteur de 100 (qui a pour seule fonction d'exprimer le résultat en pourcent) pour respecter la forme normalisée définie pour l'ensemble de nos indicateurs. L'indicateur retenu est ainsi défini par :

$$\tau_{cr} = \frac{m_{cr}}{m_p} \quad \text{où } m_{cr} = \sum_{i=1}^m m_{mr}^i$$

avec

- i : numéro d'artéfact ($1 \leq i \leq m$)
- m : nombre d'artéfacts dans le produit
- m_{cr} : masse de matière recyclée contenue dans le produit
- m_{mr}^i : masse de matière recyclée contenue dans le $i^{ème}$ artéfact
- m_p : masse totale du produit
- τ_{cr} : taux de contenu recyclé

L'indicateur proposé respecte bien la forme normalisée et définie pour l'ensemble d'indicateurs. Le tableau 76 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de l'utilisation des matières recyclées.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Matériaux	Utiliser des matériaux recyclés	Valorisation matière

Tableau 76. Lignes directrices associées au levier d'action utilisation des matières recyclées

2.3.2.3. Définition d'indicateurs associés aux leviers d'action de transmission d'informations et mise en correspondance avec les lignes directrices

En complément aux indicateurs et aux indices de performance associés aux leviers d'action de choix de conception proposés précédemment (voir § 2.3.2.2), cette partie s'intéresse à définir ceux associés à la transmission d'informations (voir Chapitre 3, figure 42).

2.3.2.3.1. Communication

L'indicateur de communication est associé à un levier d'action qui ne concerne pas un choix de conception mais la transmission d'informations. Il vise ainsi à évaluer si des informations concernant les modalités de traitement en fin de vie sont communiquées aux utilisateurs du produit ou aux acteurs de la filière. L'indicateur proposé pour notre démarche est présenté dans le tableau 77.

Cas	Cn
Le produit fournit des informations concernant les modalités de traitement en fin de vie aussi bien aux utilisateurs du produit qu'aux acteurs de la filière	1
Le produit fournit des informations concernant les modalités de traitement en fin de vie uniquement aux utilisateurs du produit ou aux acteurs de la filière	0,5
Le produit ne fournit aucune information concernant les modalités de traitement en fin de vie	0

Tableau 77. Indicateur de communication

où C_n désigne la qualité de communication des informations.

L'indicateur proposé respecte bien la forme normalisée définie pour l'ensemble d'indicateurs. Le tableau 78 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de la communication des informations.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Informations	Fournir des informations utiles au traitement	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière
	Fournir à l'utilisateur des informations sur les modalités de traitement du produit ou de ses parties	Valorisation fonctionnelle Valorisation matière

Tableau 78. Lignes directrices associées au levier d'action communication

2.3.2.3.2. Identification

De la même façon que l'indicateur de communication présenté précédemment (voir § 2.3.2.3.1), l'indicateur d'identification est associé à un levier d'action qui ne concerne pas un choix de conception mais la transmission d'informations. Il vise ainsi à évaluer d'une part si le produit, les composants ou les matériaux ont été marqués ou étiquetés pour simplifier leur identification lors du traitement en fin de vie, et d'autre part si le système d'identification utilisé sera facilement assimilé par les acteurs de la filière (autrement dit, normalisé et visible). L'indicateur proposé pour notre démarche est présenté dans le tableau 79.

Cas	Id_c
Le produit, le module, la pièce ou le matériau est marqué ou étiqueté pour simplifier son identification La codification du marquage ou l'étiquette est normalisé Le marquage ou l'étiquette est disposé dans un endroit visible	1
Le produit, module, pièce ou matériau est marqué ou étiqueté pour simplifier son identification La codification du marquage ou l'étiquette est normalisé. Le marquage ou l'étiquette n'est pas disposé dans un endroit visible	0,5
Le produit, module, pièce ou matériau est marqué ou étiqueté pour simplifier son identification. La codification du marquage ou l'étiquette n'est pas normalisé Le marquage ou l'étiquette est disposé dans un endroit visible	0,5
Le produit, module, pièce ou matériau est marqué ou étiqueté pour simplifier son identification. La codification du marquage ou l'étiquette n'est pas normalisé Le marquage ou l'étiquette n'est pas disposé dans un endroit visible	0,25
Le produit, le module, la pièce ou le matériau n'est pas marqué ou étiqueté pour simplifier son identification	0

Tableau 79. Indicateur d'identification

où Id_c désigne la facilité d'identification du composant.

L'indicateur proposé respecte bien la forme normalisée définie pour l'ensemble d'indicateurs. Le tableau 80 montre les lignes directrices à appliquer lorsque l'artéfact analysé est identifié comme non performant vis-à-vis de son système d'identification.

Champ d'action	Lignes directrices	Voie de valorisation concernée
Marquage et étiquetage	Codification et marquage (standardisé) des matériaux pour faciliter leur identification (notamment les pièces en plastique et similaires)	Valorisation matière
	Étiquetage (normalisé) des produits et composants sur les possibilités de recyclage, l'incompatibilité et/ou la toxicité afin qu'ils puissent être facilement identifiés des recyclables et des flux de déchets	Valorisation matière
	Éliminer les étiquettes incompatibles avec le traitement de fin de vie	Valorisation matière
	Disposer les éléments d'identification dans des endroits facilement visibles	Valorisation matière

Tableau 80. Lignes directrices associées au levier d'action identification

2.4. Étape 3.

Réconception du produit

Le point de départ de cette étape est l'ensemble stratégies d'amélioration (présentées sous forme des lignes directrices d'écoconception) fournies au concepteur à la fin de l'étape précédente. Le concepteur reconçoit ainsi l'artéfact retenu en s'appuyant sur les lignes directrices afin d'améliorer les caractéristiques identifiées comme non performantes, et augmenter en conséquence la valorisabilité.

Il est important de bien noter que le concepteur s'intéresse au bon artéfact (c.-à-d. le plus problématique, car le moins valorisable) grâce à l'évaluation de la valorisabilité du produit, et utilise les leviers d'action les plus appropriés grâce à l'outillage des lignes directrices d'écoconception. L'outil permet ainsi de créer un lien entre l'évaluation de la valorisabilité du produit et les lignes directrices d'écoconception, et de simplifier la démarche de conception.

3. Design from EoL.

Développement d'un outil d'aide à la décision en conception piloté par l'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée

La filière de valorisation fournit plusieurs produits issus de ces différentes voies de traitement. Par exemple, la valorisation fonctionnelle peut fournir des produits complets (valorisation fonctionnelle totale) ou des modules et des pièces (valorisation fonctionnelle partielle). La valorisation matière fournit des matières recyclées. La valorisation énergétique ou la méthanisation fournit de l'énergie thermique ou du gaz. L'ensemble de ces produits sortant du processus de fin de vie doit répondre aux besoins de possibles clients qui peuvent les acheter et les utiliser.

Nous nous intéressons ici au concepteur en tant que client de la filière pour stimuler son intérêt à intégrer la matière recyclée dans un nouveau produit. Cette matière première secondaire doit donc répondre aux exigences du cahier de charges de conception. *Notons cependant que d'autres artéfacts pourraient aussi être considérés (p. ex. toute pièce ou tout module reconditionnés qui peuvent intégrer un nouveau produit). Néanmoins, l'exemple classique de la matière première secondaire permettra de mieux fixer les idées.*

Promouvoir l'utilisation de la matière recyclée en conception de produit est une démarche fondamentale pour favoriser l'économie circulaire. C'est pourquoi, nous nous intéressons au développement d'un outil de conception permettant de vérifier la viabilité d'utilisation d'une matière recyclée (c.-à-d. faisabilité et pertinence) et de simplifier ainsi le processus de choix des matériaux. Cet outil s'inscrit dans une démarche de « *conception depuis la fin de vie* ».

L'évaluation de la viabilité d'utilisation d'une matière recyclée implique de vérifier comment elle a été valorisée. Nous avons constaté dans le paragraphe précédent (voir § 2) que la valorisabilité est évaluée sur trois dimensions (technique, économique et environnementale). Nous avons aussi observé que la dimension technique s'intéresse à l'évaluation de la *performance* technique du traitement du produit, et les deux autres dimensions à l'évaluation de la *pertinence* économique et environnementale du traitement. Par extrapolation, on définit que le concepteur cherchant à utiliser la matière recyclée doit valider que les propriétés techniques de la matière ont été bien recouvrées et que cette valorisation a été pertinente sur les plans économique et environnemental.

Des outils d'aide à la décision en conception centrés sur le choix de matériaux existent dans la littérature. Par exemple, l'outil *ecodesign PILOT* propose quelques lignes directrices associées au choix sélectif des matériaux pour la réduction des impacts environnementaux (Wimmer et Züst 2001)

- utiliser des matériaux qui bénéficient d'une bonne évaluation environnementale ;
- éviter ou réduire l'utilisation de matériaux ou de composants toxiques ;
- préférer l'utilisation de matériaux issus de matières premières renouvelables ;
- préférer des matières premières recyclables ;
- éviter les associations irréversibles de matériaux ;
- éviter les matières premières et les pièces dont l'origine pose problème.

La méthode d'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée proposée est présentée dans les prochains paragraphes (voir § 3.1 et § 3.2).

3.1. Description de la méthode d'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée

L'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée est une approche complémentaire à celle

proposée dans le paragraphe précédent (voir § 2). L'objectif est de donner au concepteur des éléments de validation pour juger (et justifier si besoin est) la pertinence d'utilisation de la matière recyclée.

La viabilité d'utilisation de la matière recyclée est évaluée à partir d'un indice agrégeant trois indicateurs dont chacun concerne l'une des dimensions retenues (voir figure 60).

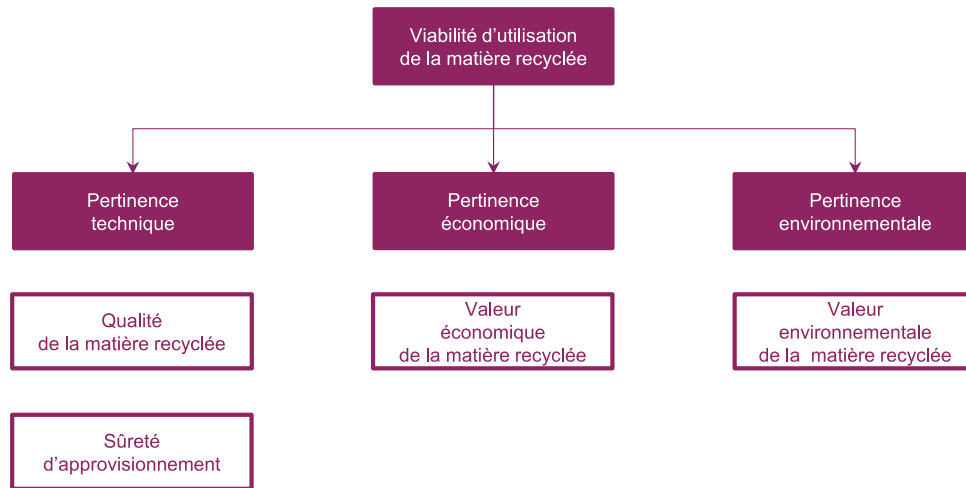


Figure 60. Démarche d'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée

L'indice donnera une note autour de 1. Si la note est supérieure à 1, il indique qu'utiliser la matière recyclée est plus pertinent qu'utiliser de la matière vierge.

3.2. Construction de l'indice de viabilité d'utilisation de la matière recyclée

La construction de l'indice de viabilité d'utilisation de la matière recyclée est menée en trois étapes. Les indicateurs permettant d'évaluer la viabilité d'utilisation de la matière recyclée dans chaque dimension retenue sont d'abord définis (voir § 3.2.1), la méthode de pondération est ensuite abordée (§3.2.2) et enfin, la méthode d'agrégation est choisie (§ 3.2.3).

3.2.1. Sélection des indicateurs d'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée

3.2.1.1. Évaluation de la pertinence technique de l'utilisation de la matière recyclée

Tel qu'évoqué précédemment, le concepteur (en tant qu'utilisateur de la matière issue des filières de recyclage) doit s'assurer que le matériau choisi réponde à son cahier de charges. La pertinence technique doit donc être vérifiée. Nous proposons de l'évaluer à partir de deux paramètres : la qualité de la matière recyclée et la sûreté d'approvisionnement.

D'une part, la qualité de la matière recyclée s'intéresse à vérifier que les propriétés techniques de la matière ont été bien recouvrées. À ce sujet, l'utilisation d'un facteur de pureté ayant pour but de prendre en compte la préservation de qualité dans les matériaux recyclés a pu être observée dans l'évaluation de la recyclabilité des matériaux (voir § 2.3.2.2.8.3). Le taux de pureté est donc retenu comme indicateur. D'autre part, les matières premières dont l'approvisionnement pose problème doivent être évitées (Wimmer et Züst 2001). En effet, les

flux des déchets varient en quantité et en composition, et les fournisseurs de matières premières secondaires peuvent être sensibles à cette particularité de leur flux d'entrée. L'équipe de conception en partenariat avec le service achat, doit donc s'assurer que le fournisseur de matière recyclée est capable de fournir la matière en qualité, quantité et dans les délais nécessaires. La sûreté d'approvisionnement est ainsi proposée comme deuxième paramètre à prendre en compte. L'indicateur est présenté dans le tableau 81.

Cas	s_{am}
Le fournisseur de la matière recyclée respecte le cahier des charges fournisseurs	1
Le fournisseur de la matière recyclée ne respecte pas le cahier des charges fournisseurs	0

Tableau 81. Indicateur de sûreté d'approvisionnement

où s_{am} désigne la sûreté d'approvisionnement du matériau.

L'indice de pertinence technique doit agréger les deux indicateurs évoqués ci-dessus. Une agrégation sous forme de produit a été retenue pour que l'indice soit sensible aux faibles valeurs. Nous nous intéressons notamment à l'indicateur de sûreté d'approvisionnement. En effet, si la sûreté d'approvisionnement n'est pas garantie, la valeur de l'indice sera zéro car l'utilisation n'est pas pertinent (même avec une matière de bonne qualité). En revanche, si la sûreté est garantie la pertinence est uniquement fonction de la qualité de la matière recyclée. L'indice de l'utilisation de la matière recyclée est donc défini comme suit

$$p_{teu} = 2 - (\tau_p \times s_{am})$$

avec

p_{teu} : pertinence technique de l'utilisation de la matière recyclée

τ_p : taux de pureté du matériau (recyclé)

s_{am} : sûreté d'approvisionnement du matériau (recyclé)

3.2.1.2. Évaluation de la pertinence économique de l'utilisation de la matière recyclée

Pour déterminer la dimension économique de la viabilité de l'utilisation de la matière recyclée, l'indicateur doit confronter le prix des matières premières secondaires (c.-à-d. recyclées) au prix des matières premières primaires (c.-à-d. vierges). L'indicateur à utiliser est ainsi le suivant :

$$p_{ecu} = \frac{v_{ec}}{v_{ec,ref}}$$

avec

p_{ecu} : pertinence économique de l'utilisation de la matière recyclée

v_{ec} : valeur économique matériau (recyclé)

$v_{ec,ref}$: valeur économique de référence du matériau (vierge)

3.2.1.3. Évaluation de la pertinence environnementale de l'utilisation de la matière recyclée

Nous avons aussi défini que la pertinence environnementale du traitement vise à évaluer si le traitement en fin de vie est plus ou moins impactant que la production de matières premières ou que la fabrication du

produit (voir § 2.2.4.3). Pour déterminer la dimension environnementale de la viabilité de l'utilisation de la matière recyclée, l'indicateur doit donc confronter les impacts environnementaux générés par la production des matières premières secondaires (c.-à-d. par le recyclage) aux impacts générés dans la production des matières premières primaires. Il s'agit donc d'un cas particulier de la performance environnementale du traitement définie précédemment. L'indicateur à utiliser est ainsi le suivant :

$$p_{enu} = \frac{\sum_{k=1}^s \frac{v_{en}^k}{v_{en,ref}^k}}{s}$$

avec

k : numéro de catégorie d'impact ($1 \leq k \leq s$)

p_{enu} : pertinence environnementale de l'utilisation de la matière recyclée

v_{en}^k : valeur environnementale du matériau (recyclé) dans la $k^{\text{ème}}$ catégorie d'impact

$v_{en,ref}^k$: valeur environnementale de référence du matériau (vierge) dans la $k^{\text{ème}}$ catégorie d'impact

s : nombre de catégories d'impacts

3.2.2. Sélection de la méthode de pondération

De même que pour l'indice de valorisabilité, nous souhaitons que les trois dimensions permettant d'évaluer la viabilité d'utilisation de la matière recyclée soient jugées avec la même importance. La méthode de pondération retenue est ainsi la *méthode de pondération égale*.

3.2.3. Sélection de la méthode d'agrégation

Pour définir l'indice de viabilité d'utilisation de la matière recyclée, la méthode de construction formelle d'un indice de Maurin (Maurin 2007) a été à nouveau utilisée comme référence pour le choix de la fonction d'agrégation. À la différence de l'indice de Maurin, on souhaite ici que la variation de chaque indicateur intervienne de la même manière dans l'indice. Nous ne cherchons pas donc à donner de la sensibilité aux valeurs les plus grandes comme dans l'étude originale. Nous souhaitons que la variation de chaque indicateur intervienne de la même manière dans l'indice. C'est pourquoi, la fonction symétrique fondamentale, algébrique et homogène de degré 1 sous forme de moyenne a été retenue. L'indice de viabilité d'utilisation de la matière recyclée est défini comme suit :

$$Vu = \frac{p_{teu} + p_{ecu} + p_{enu}}{3}$$

avec

Vu : viabilité d'utilisation de la matière recyclée

p_{teu} : pertinence technique de l'utilisation de la matière recyclée

p_{ecu} : pertinence économique de l'utilisation de la matière recyclée

p_{enu} : pertinence environnementale de l'utilisation de la matière recyclée

4. Synthèse

Le premier outil développé s'inscrit dans une démarche de *conception pour la fin de vie*. Il cherche à établir un lien entre l'évaluation de la valorisabilité du produit et les lignes directrices d'écoconception pour que le concepteur puisse plus facilement interpréter les résultats et informations auxquels il est confronté, et simplifier d'autant son processus de conception. Un indice qui agrège les dimensions techniques, économiques et environnementales de la valorisabilité, a été défini. Cet indice permet de hiérarchiser facilement les composants du produit selon leur valorisabilité.

Les 33 leviers d'actions identifiés dans les lignes directrices ont été outillés avec des indicateurs. Ils permettent de savoir si les caractéristiques du produit que l'on souhaite ou doit modifier sont performantes par rapport à un objectif ou une référence. Les indicateurs sont tous exprimés sur la même échelle pour que la performance des leviers d'action puisse être comparée. Ils ont les caractéristiques suivantes :

- la valeur du résultat est contenue dans l'intervalle de 0 à 1 ;
- la valeur de 1 doit correspondre à la meilleure note et 0 à la pire.

Les leviers d'action identifiés comme non performants sont ensuite associés aux lignes directrices d'écoconception. L'association consiste à conseiller le concepteur d'appliquer les lignes directrices présentées à la fin de paragraphe de chaque levier d'action. L'impact que l'inclusion des lignes directrices a sur la valorisabilité du produit n'est pas mesurable car les informations disponibles ne nous permettent pas de quantifier l'apport bénéfique d'un tel changement sur le traitement en fin de vie. Cependant, on sait que les efforts de conception agissent dans la bonne direction car l'artéfact modifié est celui ayant la pire valorisabilité, et les caractéristiques adressées sont les moins performantes.

Il faut aussi noter qu'un grand nombre des indicateurs proposés ont été définis de façon très simple (p. ex. en s'appuyant sur des tableaux dans lesquels les cas de figure se traduisent par des valeurs). L'idée est que le concepteur puisse évaluer son produit de façon simple et rapide. Les informations pourraient être obtenues à partir d'un questionnaire dans un outil logiciel (comme par exemple Ecodesign Pilot). Les leviers d'action que le concepteur doit utiliser pour son évaluation sont définis selon la voie de valorisation identifiée comme problématique pour le composant en cours d'amélioration.

Le deuxième outil s'inscrit dans une démarche de *conception depuis la fin de vie*. Il cherche à vérifier la viabilité d'utilisation de la matière recyclée et de simplifier ainsi le processus de choix des matériaux en conception. L'outil vise ainsi à encourager l'utilisation de la matière recyclée (ou tout autre artéfact de deuxième vie) et à favoriser l'économie circulaire. De même que pour la valorisabilité, l'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée est déclinée sur les plans techniques, économiques et environnementaux. Un indice qui agrège la pertinence d'utilisation sur les trois dimensions a été défini pour simplifier la prise de décision en conception.

La mise en œuvre des deux outils proposés ci-dessus cherche à créer une bijectivité des échanges entre les concepteurs et les acteurs de la filière de traitement. C'est pourquoi, les deux propositions seront mises à l'essai dans le prochain chapitre lors d'une étude de cas visant à évaluer à la fois leur pertinence et leur applicabilité.

Chapitre 5

Cas d'étude

Résumé Dans ce chapitre, l'outil d'aide à la décision en conception piloté par l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit et l'outillage des lignes directrices d'écoconception d'une part, et l'outil d'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée d'autre part sont appliqués pour en évaluer l'opérationnalisation et valider notre proposition.

Dans ce cadre, le Fairphone 2[®] est choisie comme produit d'étude. La compagnie a réalisé plusieurs études et la plupart des informations (techniques, économiques et environnementales) en étant issues sont mises à la disposition du public.

Ce travail de validation de la proposition est mené en trois étapes :

- (i) Dans un premier temps, nous comparons trois scénarios de traitement en fin de vie pour valider la proposition de méthode d'évaluation multidimensionnelle de la valorisabilité du produit. Ce sont (i) la dépollution et la récupération de métaux par fusion du Fairphone[®], (ii) le démontage des modules et la récupération sélective par fusion, et (iii) le broyage, le prétraitement physique et la métallurgie. L'indice de valorisabilité de chaque scénario est calculé pour déterminer lequel assure la meilleure valorisabilité sur les différents plans envisagés ;
- (ii) Ensuite, nous cherchons à valider l'outillage des lignes directrices d'écoconception comme outil d'aide à la décision en conception. La performance du Fairphone 2[®] vis-à-vis d'une valorisation fonctionnelle est évaluée dans un premier temps. La performance de sa valorisation matière l'est ensuite. Puisque le Fairphone 2[®] a été conçu de façon modulaire pour le rendre facilement réparable ou susceptible de monter en gamme, et donc pour prolonger sa durée de vie. Ainsi, nous nous attendons à obtenir un score performant pour la valorisation fonctionnelle et un plus faible pour la valorisation matière ;
- (iii) Enfin dans le cadre de l'économie circulaire, nous nous intéressons à évaluer la viabilité d'utilisation d'un matériau recyclé issu de la filière des DEEE.

Table des matières du Chapitre 5

1. Introduction	241
2. Caractérisation du produit considéré	242
3. Description de la filière de traitement en fin de vie du Fairphone 2®	243
3.1. Cadre réglementaire des DEEE	244
3.2. Organisation de la filière des DEEE	245
3.2.1. Classement des DEEE	245
3.2.2. Organisation de la filière	246
4. Validation de la proposition de méthode d'évaluation de la valorisabilité du produit comme outil d'aide à la décision en conception	247
4.1. Description des scénarios de fin de vie	247
4.1.1. Scénario 1 Récupération de matière par fusion du Fairphone 2®	247
4.1.2. Scénario 2 Démantèlement et récupération sélective par fusion	248
4.1.3. Scénario 3 Broyage, prétraitement physique et métallurgie	248
4.1.4. Scénario 4 Dépollution du Fairphone 2® et récupération de matière par fusion	249
4.1.5. Scénario 5 Filière DEEE française	251
4.2. Sélection des scénarios de fin de vie à modéliser	252
4.3. Évaluation conventionnelle de la valorisabilité	252
4.4. Évaluation multidimensionnelle de la valorisabilité	253
4.4.1. Évaluation de la performance technique du traitement	253
4.4.2. Évaluation de la pertinence économique du traitement	254
4.4.3. Évaluation de la pertinence environnementale du traitement	255
4.4.4. Évaluation de l'indice de valorisabilité du produit (agrégation des trois dimensions)	256
4.5. Analyse des résultats	256
5. Validation de l'outillage des lignes directrices d'écoconception comme outil d'aide à la décision en conception	258
5.1. Évaluation de la performance du produit vis-à-vis d'une valorisation fonctionnelle	258
5.1.1. Démontabilité du produit	258
5.1.2. Remontabilité du produit	267
5.1.3. Capacité à monter en gamme du produit	269
5.1.4. Réaffectabilité du produit	270
5.1.5. Réutilisabilité du produit	270
5.1.6. Standardisation des composants	271
5.2. Évaluation de la performance du produit vis-à-vis de la valorisation matière	271
5.2.1. Circularité des matériaux	272
5.2.2. Démontabilité du produit	273
5.2.3. Recyclabilité du produit	273
5.2.4. Toxicité des matériaux	278
5.2.5. Utilisation des matières recyclées	279
5.3. Analyse des résultats	280
5.3.1. Performance du Fairphone 2® vis-à-vis de sa valorisation fonctionnelle	280
5.3.2. Performance du Fairphone 2® vis-à-vis de sa valorisabilité matière	281
5.3.3. Bilan	282
6. Validation de la proposition de méthode d'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée comme outil d'aide à la décision en conception	283
6.1. Évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée	283

Chapitre 5
Cas d'étude

6.1.1. Évaluation de la pertinence technique de l'utilisation.....	283
6.1.2. Évaluation de la pertinence économique de l'utilisation.....	283
6.1.3. Évaluation de la pertinence environnementale de l'utilisation	284
6.1.4. Évaluation de l'indice de viabilité d'utilisation de la matière recyclée (agrégation des trois dimensions)	285
6.2. Analyse des résultats	285

Chapitre 5

Cas d'étude

1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de valider l'outil d'aide à la décision en conception piloté par l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit et l'outillage des lignes directrices d'écoconception proposé dans le chapitre précédent. Cette validation se fait sur un cas réel pour mesurer d'une part l'applicabilité de la méthode, et d'autre part la pertinence des résultats obtenus.

Le produit à tester est choisi pour valider nos résultats sur ceux connus et pilotés par les intentions et démarches mises en œuvre par les concepteurs. Nous avons choisi un produit inscrit dans une REP. En effet, leur traitement en fin de vie est identifié comme problématique et est donc à l'origine de coûts de gestion importants (voir Chapitre 2, § 3.1.2.2.1). Nous rappelons que les six produits associés aux filières REP européennes sont les emballages ménagers, les piles et accumulateurs, les équipements électriques et électroniques (EEE), les automobiles, les gaz fluorés et les médicaments.

Nous avons souhaité choisir un produit de référence suffisamment complexe pour tester la mise en œuvre de la démarche, et valider en outre les deux aspects complémentaires que sont la valorisation fonctionnelle et la valorisation matière. Les EEE et les véhicules répondent tous deux à ces critères. Nous avons pourtant pris le parti de travailler sur les EEE ; ce sont des produits à enjeux plus forts, la filière VHU étant à ce jour plus performante que celle des DEEE.

Le choix d'un produit de référence électrique ou électronique reste encore très vaste. Nous avons choisi de centrer notre étude sur les smartphones autour desquels s'articule de plus en plus notre quotidien. À titre d'exemple, 7 milliards de smartphones ont été vendus dans le monde depuis 2007 (dont 1 470 millions en 2016) (ADEME et France Nature Environnement 2019). Comme tout autre produit, le smartphone impacte l'environnement tout au long de son cycle de vie. Sa fabrication (de l'extraction des matières premières à l'assemblage final) est responsable d'environ trois quarts de ces impacts, qui sont en majeure partie imputables à l'écran et aux composants électroniques complexes (microprocesseurs, etc.). En effet, on compte aujourd'hui plus de 70 matériaux différents (dont environ 50 métaux) pour fabriquer un smartphone. Certains deviennent d'ailleurs de plus en plus difficiles à exploiter. En ce qui concerne la fin de vie, les métaux dits

précieux sont souvent présents en très petites quantités, et fréquemment en alliages complexes ce qui rend nombre d'entre eux difficiles à recycler. (ADEME et France Nature Environnement 2019)

Pour limiter l'impact du téléphone, la première règle consiste à prolonger sa durée de vie. Cependant, les smartphones font l'objet d'un cycle de renouvellement trop rapide : l'ADEME souligne que nous changeons notre téléphone en moyenne tous les deux ans et que 88 % des français changent leur téléphone portable alors qu'il fonctionne encore (ADEME et France Nature Environnement 2019).

Au sein de cette typologie de produits, le Fairphone® tient une place particulière. Fairphone® est une entreprise qui vise à développer des smartphones conçus et produits avec un impact environnemental minimal. Ainsi, le deuxième smartphone lancé par cette entreprise (le Fairphone 2® ; voir figure 61) a été conçu pour être facilement réparé et susceptible de monter en gamme. Une autre particularité de cette entreprise est sa transparence. Elle partage en effet une grande partie de ses pratiques de production pour donner un aperçu de ce qu'implique l'obtention des matériaux et des composants, ainsi que de la production, du transport, de la réparation et du recyclage du téléphone. L'objectif est que les entreprises et les consommateurs aient un meilleur aperçu :

- des pratiques de production, des conditions de travail, des heures de travail et des règlements en matière de santé et de sécurité sur les produits que les consommateurs utilisent et achètent ;
- de l'origine des matières premières (c.-à-d. transparence dans la chaîne d'approvisionnement) ;
- du fonctionnement des entreprises (dont le fonctionnement économique).

(Fairphone 2013)



Figure 61. Fairphone 2®

Dans le cadre de cette politique de transparence, Fairphone® a réalisé plusieurs études très documentées sur ses produits. La plupart des informations techniques, économiques et environnementales sont mises à la disposition du public. Le Fairphone 2® a par exemple été l'objet de plusieurs études dont l'évaluation de l'impact de son cycle de vie, de sa recyclabilité, la décomposition des coûts, etc. C'est pourquoi, nous avons choisi de valider notre étude sur ce produit.

2. Caractérisation du produit considéré

Le Fairphone 2® est le premier smartphone *modulaire* disponible pour le grand public. Sa structure facilite sa réparabilité et augmente en conséquence sa durée de vie. Il est constitué de sept modules (voir figure 62) :

- le *module central*, composé principalement par la carte mère, les antennes et l'assemblage des boutons de volume, d'alimentation et la caméra ;

- le *module écran* équipé d'un écran Full HD de 5 pouces et d'un verre Gorilla Glass 3 ;
- le *module supérieur* qui comprend une caméra frontale de 2 mégapixels, un récepteur, un connecteur pour casque et un microphone anti-bruit. Il comprend également la LED et les capteurs de lumière ambiante et de proximité ;
- le *module caméra* équipé d'une caméra arrière de 8 mégapixels et d'un flash ;
- le *module inférieur* contenant le haut-parleur, le moteur vibrant, le connecteur USB et le microphone ;
- le *module arrière* correspondant à la coque de protection en plastique ;
- et enfin le *module batterie*, composé d'une batterie lithium-ion d'une capacité de 2440 mAh.

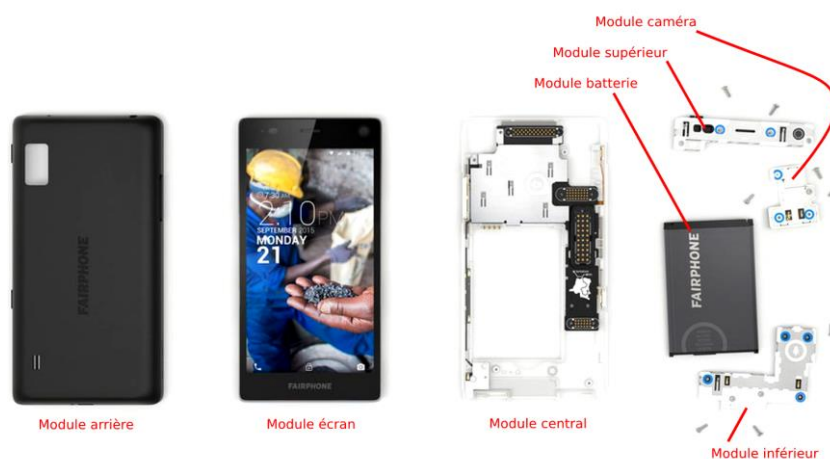


Figure 62. Modules du Fairphone 2®

La nomenclature du Fairphone 2® est présentée en Annexe 2, par composants au tableau 128, et par matériaux au tableau 129. Ces deux nomenclatures ont été définies en grande partie à partir des informations diffusées par Fairphone®. Cependant, plusieurs hypothèses ont dû être proposées pour compléter les informations manquantes. Les résultats des analyses présentés dans ce chapitre ne seront donc valables que pour *notre* définition du Fairphone 2®.

En outre, les étapes permettant de démonter les différents modules du téléphone sont décrites ci-dessous et présentés dans la figure 63 :

- **Étape 1.** Enlever la coque (voir figure 63a) ;
- **Étape 2.** Enlever la batterie (voir figure 63b) ;
- **Étape 3.** Séparer l'écran du reste (voir figure 63c) ;
- **Étape 4.** Démonter les modules supérieur, caméra et inférieur du module central (voir figure 63d).

3. Description de la filière de traitement en fin de vie du Fairphone 2®

Lorsqu'il sera en fin de vie, le Fairphone 2® (EEE) sera intégré par la filière des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Dans ce paragraphe, le cadre réglementaire et l'organisation de la filière sont présentés.



Figure 63. Démontage du Fairphone 2® (iFixit 2015)

3.1. Cadre réglementaire des DEEE

La directive DEEE II (Directive 2012/19/CE) et la directive RoHS II (Directive 2011/65/UE) fixent les obligations au niveau européen (Parlement Européen et Conseil de l'Union Européenne 2011; 2012).

La première directive (DEEE II) vise à améliorer la gestion des DEEE destinés à la mise en décharge et impose notamment :

- l'écoconception des EEE, pour favoriser le réemploi (p. ex. en prolongeant leur durée de vie) et améliorer son traitement en fin de vie (p. ex. en facilitant son démontage) ;
- la collecte sélective des DEEE, avec des objectifs de collecte et une obligation de reprise gratuite de l'ancien appareil lors de la vente d'un nouveau ;
- le traitement systématique de certains composants (cartes de circuits imprimés, lampes à décharge, etc.) et de substances dangereuses (mercure, CFC, etc.) pour prévenir toute pollution ultérieure ;

- la valorisation des DEEE collectés en suivant la hiérarchie de traitement des déchets, avec des objectifs de recyclage et de valorisation.

(ADEME et al. 2018)

Un registre des producteurs d'EEE permettant la collecte de données relatives à la mise sur le marché, à la collecte et au traitement annuel des équipements dans chaque état membre a aussi été établi grâce à la directive DEEE.

La deuxième directive (RoHS II) élimine certaines substances dangereuses des nouveaux EEE. Elle établit ainsi une liste de substances dont l'utilisation est interdite ou très limitée dans la composition et la fabrication des EEE.

3.2. Organisation de la filière des DEEE

3.2.1. Classement des EEE

Les EEE sont classés selon les catégories définies par la réglementation et doivent être valorisés en fin de vie selon des objectifs minimaux établis par chacune.

Depuis 2006, les EEE étaient classés en 10 catégories. Cependant, la transposition en droit français de la directive DEEE II a ajouté une 11^e catégorie pour les panneaux photovoltaïques. Les catégories d'EEE (utilisées du 1^{er} janvier 2015 au 14 août 2018) ainsi que les objectifs minimaux de valorisation (appliqués entre 2016 et 2018) sont présentés au tableau 82.

Catégories d'EEE (anciennes)	Objectifs minimaux	
	Réutilisation et recyclage	Valorisation
1 Gros appareils ménagers		
1A - Équipements d'échange thermique	80 %	85 %
1B - Autres gros appareils ménagers		
2 Petits appareils ménagers	55 %	75 %
3 Équipements informatiques et de télécommunications		
3A - Écrans, moniteurs et équipements comprenant des écrans d'une surface supérieure à 100 cm ² ,	70 %	80 %
3B - Autres équipements informatiques et de télécommunications		
4 Matériel grand public		
4A - Écrans, moniteurs et équipements comprenant des écrans d'une surface supérieure à 100 cm ²	70 %	80 %
4B - Autres matériels grand public		
5 Matériel d'éclairage	55 %	75 %
6 Outils électriques et électroniques	55 %	75 %
7 Jouets, équipements de loisirs et de sport	55 %	75 %
8 Dispositifs médicaux	55 %	75 %
9 Instruments de surveillance et de contrôle	55 %	75 %
10 Distributeurs automatiques	80 %	85 %
11 Panneaux photovoltaïques	70 %	80 %

Tableau 82. Anciennes catégories d'EEE et objectifs de valorisation par catégorie (ADEME et al. 2018)

Depuis le 15 août 2018, une nouvelle classification en sept catégories seulement est utilisée. Les nouvelles sont plus proches des flux de collecte, c'est-à-dire qu'elles correspondent davantage aux types de DEEE collectés puis traités séparément. Cette nouvelle classification permet de comparer plus facilement les types d'équipements collectés par rapport aux équipements mis sur le marché, qui depuis cette année sont classés dans l'une de ces sept catégories. (ADEME et al. 2018)

Catégories d'EEE (nouvelles)	Objectifs minimaux	
	Réutilisation et recyclage	Valorisation
1 Équipement d'échange thermique	80 %	85 %
2 Écrans, moniteurs et équipements comprenant des écrans d'une surface supérieure à 100 cm ²	70 %	80 %
3 Lampes	80 %	-
4 Gros équipements	80 %	85 %
5 Petits équipements	55 %	75 %
6 Petits équipements informatiques et de télécommunications	70 %	80 %
7 Panneaux photovoltaïques	80 %	85 %

Tableau 83. Nouvelles catégories d'EEE et objectifs de valorisation depuis 2019 (ADEME et al. 2018)

3.2.2. Organisation de la filière

L'organisation de la filière DEEE est différente suivant qu'il s'agisse de DEEE ménagers ou professionnels. Nous nous intéressons dans ce chapitre à la filière des DEEE ménagers. Dans ce cadre, les producteurs d'équipements ménagers (ou assimilés) ont deux possibilités d'organisations :

- mettre en place et faire approuver un système individuel de collecte et de traitement (aujourd'hui, aucun système individuel n'est approuvé) ;
- adhérer à un éco-organisme agréé pour la collecte et le traitement des équipements ménagers (qui traite de manière collective les déchets de multiples producteurs) ;

(ADEME et al. 2018)

3.2.2.1. Les éco-organismes

Au 1^{er} janvier 2018, trois éco-organismes sont agréés pour la collecte et le traitement des DEEE ménagers en France (ADEME et al. 2018). Le tableau 84 les présente et spécifie leurs catégories d'agrément.

Éco-organisme	Catégories d'agrément
Ecologic	Tous DEEE hors catégories 5 et 11
ESR	Tous DEEE hors catégorie 11
PV CYCLE	DEEE de la catégorie 11 (panneaux photovoltaïques)

Tableau 84. Éco-organismes agréés pour la collecte et le traitement des DEEE ménagers

3.2.2.2. Organisations des flux physiques

Les flux physiques de la filière de DEEE en France ne sont donc pas organisés selon les onze catégories présentées dans le tableau 82, mais selon les six flux physiques définis par les modes de collecte (voir tableau 85) (ADEME et al. 2018). En France, les téléphones portables sont traités avec les autres petits appareils électriques et électroniques (imprimante, aspirateur, grille-pain, etc.) (ADEME 2018). Les smartphones sont ainsi traités dans le flux PAM (petits appareils en mélange).

Flux de collecte
GEM Froid (GEM F) - Gros électroménager froid
GEM Hors Froid (GEM HF) - Gros électroménager hors froid
Écrans
PAM (petits appareils en mélange)
Lampes
Panneaux photovoltaïques

Tableau 85. Flux de collecte des DEEE ménagers

4. Validation de la proposition de méthode d'évaluation de la valorisabilité du produit comme outil d'aide à la décision en conception

La proposition de méthode d'évaluation multidimensionnelle de la valorisabilité comme outil d'aide à la décision en conception est testée sur une étude de cas. D'abord, des scénarios de fin de vie possibles seront établis. La valorisabilité sera ensuite évaluée en deux temps : d'abord, de façon conventionnelle, puis en suivant une approche multidimensionnelle. L'analyse des résultats se fera en fin de paragraphe.

4.1. Description des scénarios de fin de vie

À l'issue d'une revue de la littérature, cinq scénarios de fin de vie ont été identifiés.

Les trois premiers ont été définis dans une étude sur la recyclabilité du Fairphone 2® (Fairphone 2017; Markus Reuter, Schaik, et Ballester 2018). Elle est basée sur une simulation des procédés sur HSC Chemistry/Sim et prend en compte les meilleures techniques disponibles, les limites du design du produit et ce qui est physiquement possible selon les lois de la thermodynamique.

4.1.1. Scénario 1

Récupération de matière par fusion du Fairphone 2®

Ce scénario consiste à introduire l'ensemble du Fairphone 2® dans un réacteur métallurgique à haute température, et à récupérer les métaux, alliages et autres composés inorganiques (voir figure 64). Le reste du processus est illustré à la figure 2 du rapport sur la recyclabilité du Fairphone 2® (Fairphone 2017).

Les auteurs précisent que cette voie permet la récupération de tous les métaux qui ont une forte affinité pour le cuivre (p. ex. l'or, l'argent, le palladium et le cuivre lui-même) tandis que les métaux moins nobles comme le magnésium, l'aluminium, l'acier, le lithium, le tungstène et leurs éléments d'alliage finissent dans les scories. En revanche, aucun plastique n'est récupéré.

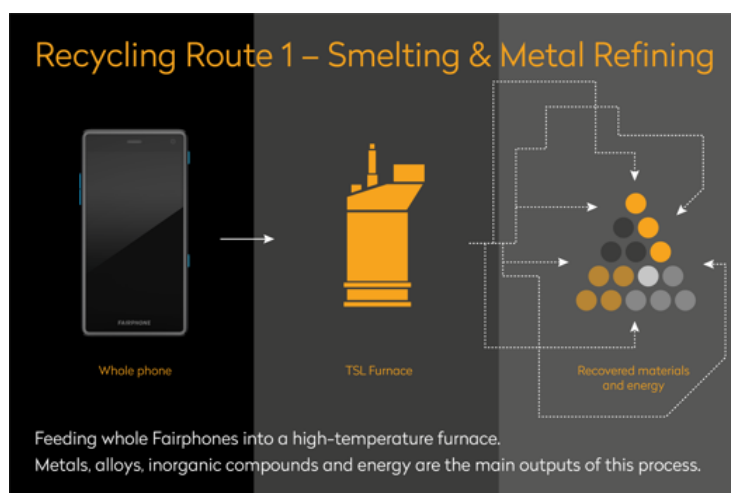


Figure 64. Synopsis du scénario 1 de traitement en fin de vie (Fairphone 2017; Markus Reuter, Schaik, et Ballester 2018)

4.1.2. Scénario 2

Démantèlement et récupération sélective par fusion

Les modules du Fairphone 2® sont séparés et des processus de récupération métallurgique et plastique plus appropriés sont mis en place :

- les modules central, supérieur, inférieur et caméra, sont envoyés dans un four métallurgique à haute température ;
- le module écran est fondu et passe au raffinage pour métaux légers afin de récupérer d'autres matériaux tels que le magnésium ;
- la batterie est traitée dans un four à arc électrique, pour optimiser la récupération des matériaux tels que le lithium et le cobalt ;
- la coque arrière est enfin envoyée dans une extrudeuse à plastique, pour un meilleur recyclage du polycarbonate.



Figure 65. Synopsis du scénario 2 de traitement en fin de vie
(Fairphone 2017; Markus Reuter, Schaik, et Ballester 2018)

Les auteurs précisent que ce scénario vise à tester l'effet de la modularité. Dans ce cadre, ils n'ont donc pris en compte que le démontage des modules qui se séparent facilement (aucune autre action n'est effectuée). Ils ont observé que ce scénario fournit la plus large gamme de matériaux récupérés et, contrairement au premier, même les plastiques peuvent l'être.

4.1.3. Scénario 3

Broyage, prétraitement physique et métallurgie

La batterie est retirée puis le reste du téléphone est mis au broyeur. Les copeaux extraits sont ensuite séparés vers les flux de traitement appropriés (pyrométallurgie, raffinage et récupération de plastiques).

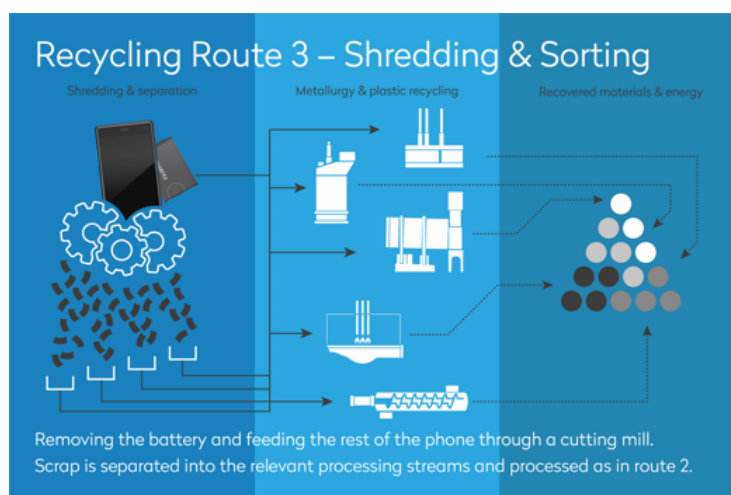


Figure 66. Synopsis du scénario 3 de traitement en fin de vie
(Fairphone 2017; Markus Reuter, Schaik, et Ballester 2018)

Les auteurs précisent que ce scénario est le meilleur pour récupérer la plupart des métaux volumineux (non précieux) tels que l'acier, l'aluminium et le magnésium. Il donne aussi les taux de récupération globaux les plus élevés en masse. Cependant, il est moins efficace pour la récupération des métaux précieux.

Cette étude prend en compte les 46 éléments contenus dans le Fairphone 2®. Cependant le rapport présente les résultats sous forme d'intervalles et n'affiche les taux obtenus que pour 20 éléments (et seulement des métaux). Les taux pour les trois scénarios considérés sont présentés dans le tableau 86.

Matériaux	Scénario 1 (%)	Scénario 2 (%)	Scénario 3 (%)
Ag	90-100	70-80	80-90
Al	0-10	10-20	10-20
Au	90-100	90-100	90-100
Co	90-100	80-90	80-90
Cr	0-10	0-10	0-10
Cu	90-100	90-100	90-100
Dy	0-10	0-10	0-10
Fe	0-10	0-10	70-80
Ga	90-100	90-100	80-90
In	90-100	90-100	80-90
Li	0-10	90-100	90-100
Mg	0-10	80-90	90-100
Nd	0-10	0-10	0-10
Ni	90-100	90-100	80-90
Pd	90-100	80-90	0-10
Pr	0-10	0-10	0-10
Pt	90-100	90-100	90-100
Sn	90-100	80-90	60-70
Ta	0-10	0-10	0-10
W	0-10	0-10	0-10

Tableau 86. Scénarios de fin de vie 1 à 3 (matériaux et taux de recyclage)

4.1.4. Scénario 4

Dépollution du Fairphone 2® et récupération de matière par fusion

Le quatrième scénario de fin de vie est issu d'une étude réalisée par l'Institut Fraunhofer IZM pour

Fairphone® (Fraunhofer IZM 2016). Une ACV du Fairphone 2® a été réalisée pour identifier les *hotspots* du cycle de vie et en déduire des voies d'amélioration envisageables.

Dans leur scénario, le Fairphone 2® est correctement recyclé en fin de vie (c.-à-d. 100 % du produit entre dans la filière de traitement). Ils ont donc considéré que l'utilisateur se défait de l'ensemble du téléphone dans un point de collecte. L'appareil est ensuite transporté jusqu'à une installation de prétraitement où le téléphone est dépollué (c'est-à-dire que la batterie est retirée de l'appareil). Le taux de dépollution a été supposé de 100 % (c.-à-d. qu'aucune perte n'est générée lors de cette opération). Le reste du téléphone (sans sa batterie) est ensuite transporté vers une installation de recyclage pour la récupération des métaux, sans aucune autre étape de démontage.

Le processus de récupération des métaux suit le flux de recyclage des métaux issus de déchets électroniques, tel que rapporté par Umicore (Hagelüken 2006) (voir figure 67).

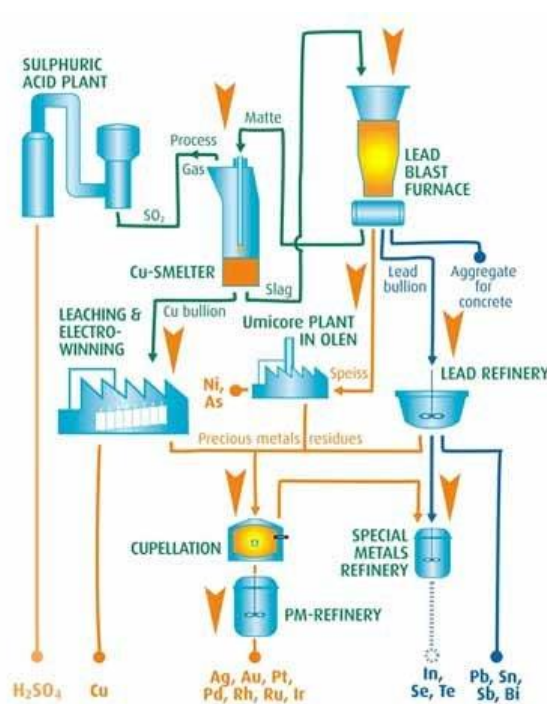


Figure 67. Processus de recyclage à Umicore (Hagelüken 2006)

Les procédés que les auteurs ont identifiés comme pertinents pour la récupération des métaux du Fairphone 2® sont (i) la fusion du cuivre, (ii) l'électro-extraction (Cu et Ni) et (iii) le raffinage de métaux précieux (Ag, Au et Pd). Les autres procédés n'ont pas été jugés suffisamment pertinents (c.-à-d. la production d'acide sulfurique, haut fourneau au plomb, raffinage du plomb et de métaux spéciaux (In, Se et Te)).

Les taux de recyclage pour les métaux sortants retenus ont été définis par les taux de recyclage de référence proposés par le Centre Commun de Recherche de la Commission Européenne (JRC) (Chancerel et al. 2016). Tous les autres matériaux constitutifs du téléphone (hors batterie) sont supposés perdus.

L'Institut Fraunhofer IZM définit aussi que les batteries sont traitées dans une usine dédiée à leur recyclage. Elles sont ainsi d'abord triées en fonction de leur composition chimique. (95 % sont triées correctement.) Puis, ils supposent que 95 % du cobalt et du cuivre sont récupérés lors du recyclage de la batterie lithium-ion. Tous les autres matériaux de la batterie sont supposés perdus.

Les métaux et les taux de valorisation retenus pour ce scénario sont présentés dans le tableau 87.

Matériaux	Fairphone® sans batterie (%)	Batterie (%)
Ag	95	N/A
Au	95	N/A
Co	N/A	95
Cu	95	95
Ni	90	N/A
Pd	95	N/A

Tableau 87. Quatrième scénario de fin de vie (matériaux et taux de recyclage) (Fraunhofer IZM 2016)

Les impacts environnementaux pour ce scénario sont définis par étape du cycle de vie.

4.1.5. Scénario 5

Filière DEEE française

La filière de choisie pour ce cas d'étude est la filière des DEEE française. À ce jour, la filière caractérise la composition des petits appareils en mélange (PAM) en 19 fractions différentes (voir tableau 88). Près de la moitié de ces données concernent le téléphone portable (elles sont indiquées en gras dans le tableau). En 2017, les taux de traitement des différentes fractions d'un PAM dans chaque voie sont aussi indiquées dans ce même tableau (ADEME et al. 2018).

Pour compléter la dimension environnementale de ce scénario, la base des données ILCV développée par Eco-systèmes par matériau et par flux de déchets des DEEE pourrait être considérée (Van Nieuwenhuysse et Lesage 2016).

	Réutilisation (%)	Recyclage (%)	Valorisation énergétique (%)	Elimination (%)
Câbles électriques extérieurs	0	43	5	52
Cartes de circuits imprimés	0	47	27	26
Cartouches toners	1	48	43	8
Composants contenant des fibres céramiques	0	0	0	100
Composants contenant du mercure	0	88	0	12
Condensateurs contenant potentiellement des PCB ou autres substances dangereuses	0	0	0	100
Déchets banals	0	0	1	99
Déchets d'amiante et composants contenant de l'amiante	0	0	0	100
Écrans plats	0	13	17	70
Résidus de broyage	0	3	22	75
Huiles	0	78	20	2
Métaux ferreux	0	99	0	1
Métaux non-ferreux	0	95	1	4
Piles et accumulateurs	0	50	0	50
Plastiques ne contenant pas de RFB³⁶	0	95	4	1
Plastiques susceptibles de contenir des RFB	0	21	39	40
Transformateurs ou autres induits moteurs	0	95	0	5
Verre	51	49	0	0
Autres	0	74	22	4

Tableau 88. Performance de traitement des PAM par la filière DEEE française en 2017 (ADEME et al. 2018)
(les données concernant le téléphone portable sont indiquées en gras)

³⁶ Retardateurs de flammes bromés

4.2. Sélection des scénarios de fin de vie à modéliser

Les scénarios de fin de vie retenus pour notre étude de cas sont principalement ceux proposés dans l'étude de recyclabilité du Fairphone 2®. Nous avons décidé de ne pas considérer le premier qui ressemble beaucoup au quatrième. La principale différence réside dans le fait que le premier n'inclut aucune étape de dépollution ; en outre le quatrième s'approche le plus du scénario réel de traitement (modélisé à partir du procédé de Umicore). Les scénarios analysés sont donc les suivants :

- Premier scénario (dépollution et récupération de matière par fusion du Fairphone® ; précédemment nommé scénario 4, voir § 4.1.4) ;
- Deuxième scénario (démontage et récupération sélective de matière par fusion ; scénario 2, voir § 4.1.2) ;
- Troisième scénario (broyage, prétraitement physique et métallurgie ; scénario 3, voir § 4.1.3).

4.3. Évaluation conventionnelle de la valorisabilité

Dans cette partie la valorisabilité est évaluée de façon conventionnelle, c'est-à-dire en utilisant les taux de valorisation fonctionnelle, matière et énergétique et le taux d'élimination (voir Chapitre 4, § 2.2.4.1.2).

Les taux de valorisabilité du Fairphone 2® et de ses modules sont présentés respectivement aux tableaux 89, 90 et 91 et illustrés aux figures 68, 69 et 70, pour les premier, deuxième et troisième scénarios.

	Valorisation fonctionnelle (%)	Valorisation matière (%)	Valorisation énergétique (%)	Élimination (%)
Fairphone 2®	0,00	9,98	33,77	56,25
Module écran	0,00	0,94	23,53	75,53
Module supérieur	0,00	2,69	60,95	36,36
Module caméra	0,00	2,41	57,12	40,48
Module inférieur	0,00	2,45	41,44	56,11
Module central	0,00	9,92	37,63	52,46
Module batterie	0,00	31,64	0,00	68,37
Module arrière	0,00	0,00	100,00	0,00

Tableau 89. Premier scénario. Taux de valorisabilité du Fairphone 2® et de ses modules

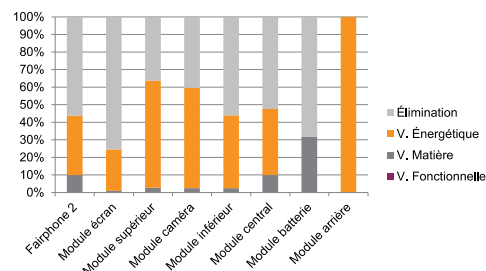


Figure 68. Premier scénario.

Taux de valorisabilité du Fairphone 2® et de ses modules

	Valorisation fonctionnelle (%)	Valorisation matière (%)	Valorisation énergétique (%)	Élimination (%)
Fairphone 2®	0,00	22,28	22,47	55,25
Module écran	0,00	5,90	23,53	70,57
Module supérieur	0,00	2,68	60,95	36,37
Module caméra	0,00	2,44	57,12	40,45
Module inférieur	0,00	2,46	41,44	56,10
Module central	0,00	9,73	37,63	52,64
Module batterie	0,00	29,97	0,00	70,03
Module arrière	0,00	94,63	4,37	1,00

Tableau 90. Deuxième scénario. Taux de valorisabilité du Fairphone 2® et de ses modules

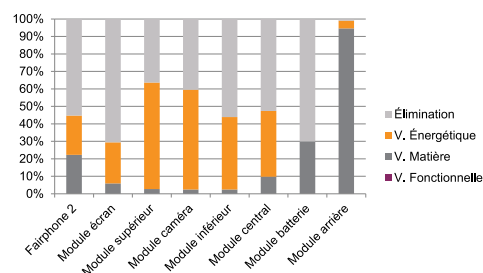


Figure 69. Deuxième scénario.

Taux de valorisabilité du Fairphone 2® et de ses modules

	Valorisation fonctionnelle (%)	Valorisation matière (%)	Valorisation énergétique (%)	Élimination (%)
Fairphone 2®	0,00	41,48	31,26	27,26
Module écran	0,00	28,86	68,40	2,74
Module supérieur	0,00	21,90	65,91	12,18
Module caméra	0,00	21,08	68,35	10,57
Module inférieur	0,00	45,10	16,16	38,74
Module central	0,00	56,00	10,47	33,52
Module batterie	0,00	29,97	0,00	70,03
Module arrière	0,00	75,80	23,40	0,80

Tableau 91. Troisième scénario. Taux de valorisabilité du Fairphone 2® et de ses modules

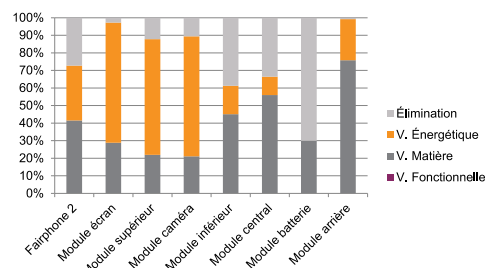


Figure 70. Troisième scénario. Taux de valorisabilité du Fairphone 2® et de ses modules

Nous observons qu'en termes massiques, le troisième scénario est celui qui offre la meilleure valorisation matière (41,48 %) et le premier scénario la plus faible (soit 9,98 %).

4.4. Évaluation multidimensionnelle de la valorisabilité

4.4.1. Évaluation de la performance technique du traitement

Les performances techniques du traitement de chaque voie de valorisation sont présentées respectivement aux tableaux 92, 93 et 94, et aux figures 71, 72 et 73 pour les premier, deuxième et troisième scénarios.

	Valorisé (%)	Non valorisé (%)
Efficacité potentielle de la valorisation fonctionnelle (EPVF)	0,00	100,00
Efficacité potentielle de la valorisation matière (EPVM)	9,98	90,02
Efficacité potentielle de la valorisation énergétique (EPME)	37,52	62,48
Efficacité potentielle de l'élimination (EPE)	100,00	0,00

Tableau 92. Premier scénario. Taux d'efficacité potentielle de valorisation du Fairphone 2®

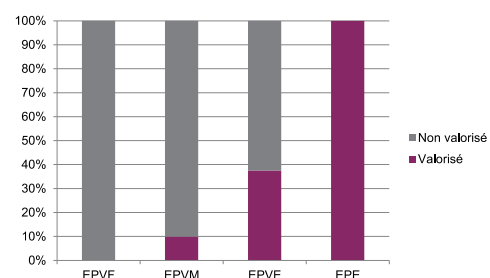


Figure 71. Premier scénario. Taux d'efficacité potentielle de valorisation du Fairphone 2®

	Valorisé (%)	Non valorisé (%)
Efficacité potentielle de la valorisation fonctionnelle (EPVF)	0,00	100,00
Efficacité potentielle de la valorisation matière (EPVM)	22,28	77,72
Efficacité potentielle de la valorisation énergétique (EPME)	28,91	71,09
Efficacité potentielle de l'élimination (EPE)	100,00	0,00

Tableau 93. Deuxième scénario. Taux d'efficacité potentielle de valorisation du Fairphone 2®

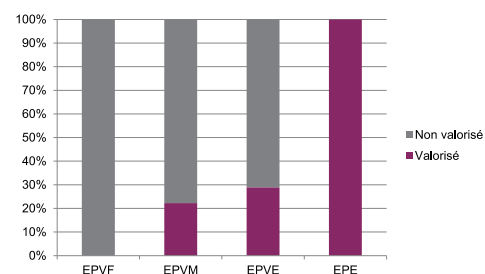


Figure 72. Deuxième scénario. Taux d'efficacité potentielle de valorisation du Fairphone 2®

	Valorisé (%)	Non valorisé (%)
Effacité potentielle de la valorisation fonctionnelle (EPVF)	0,00	100,00
Effacité potentielle de la valorisation matière (EPVM)	41,48	58,52
Effacité potentielle de la valorisation énergétique (EPME)	53,41	46,59
Effacité potentielle de l'élimination (EPE)	100,00	0,00

Tableau 94. Troisième scénario. Taux d'efficacité potentielle de valorisation du Fairphone 2®

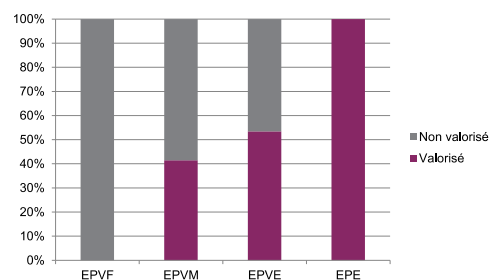


Figure 73. Troisième scénario. Taux d'efficacité potentielle de valorisation du Fairphone 2®

L'absence de valorisation fonctionnelle dans l'ensemble des scénarios retenus conduit à retrouver les mêmes résultats pour la valorisation matière. Le troisième scénario offre la valorisation matière la plus importante (41,48 %) et le premier la plus faible (soit 9,98 %).

	Récupérée (%)	Non récupérée (%)
Premier scénario	9,98	90,02
Deuxième scénario	22,28	77,72
Troisième scénario	41,48	58,52

Tableau 95. Comparaison des performances technique du traitement par scénario

4.4.2. Évaluation de la pertinence économique du traitement

Les pertinences économiques du traitement du Fairphone 2® et de ses modules sont respectivement présentées aux tableaux 96, 97 et 98 et illustrées aux figures 74, 75 et 76, pour les premier, deuxième et troisième scénarios.

	Récupérée (%)	Non récupérée (%)
Fairphone 2®	20,13	79,87
Module écran	0,40	99,60
Module supérieur	43,35	56,65
Module caméra	48,58	51,42
Module inférieur	81,90	18,10
Module central	85,57	14,43
Module batterie	59,57	40,43
Module arrière	0,00	100,00

Tableau 96. Premier scénario.

Pertinence économique du traitement du Fairphone 2® et de ses modules

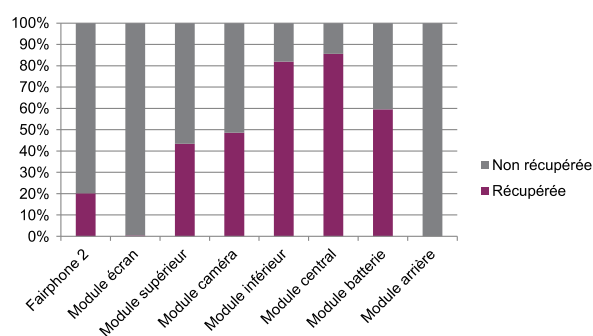


Figure 74. Premier scénario.

Pertinence économique du traitement du Fairphone 2® et de ses modules

	Récupérée (%)	Non récupérée (%)
Fairphone 2®	19,96	80,04
Module écran	0,67	99,33
Module supérieur	39,97	60,03
Module caméra	44,84	55,16
Module inférieur	79,01	20,99
Module central	80,17	19,83
Module batterie	56,43	43,57
Module arrière	78,53	21,47

Tableau 97. Deuxième scénario.

Pertinence économique du traitement du Fairphone 2® et de ses modules

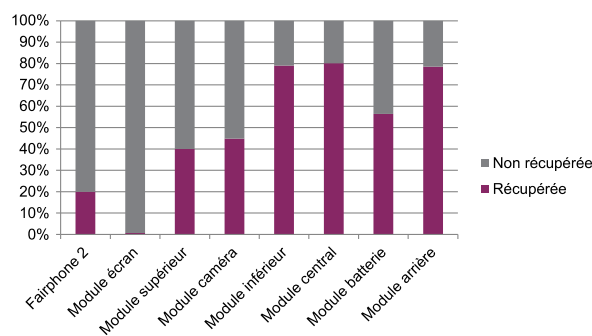


Figure 75. Deuxième scénario.

Pertinence économique du traitement du Fairphone 2® et de ses modules

	Récupérée (%)	Non récupérée (%)
Fairphone 2®	19,72	80,28
Module écran	1,33	98,67
Module supérieur	35,27	64,73
Module caméra	39,65	60,35
Module inférieur	65,86	34,14
Module central	80,35	19,65
Module batterie	56,43	43,57
Module arrière	73,31	26,69

Tableau 98. Troisième scénario.

Pertinence économique du traitement du Fairphone 2® et de ses modules

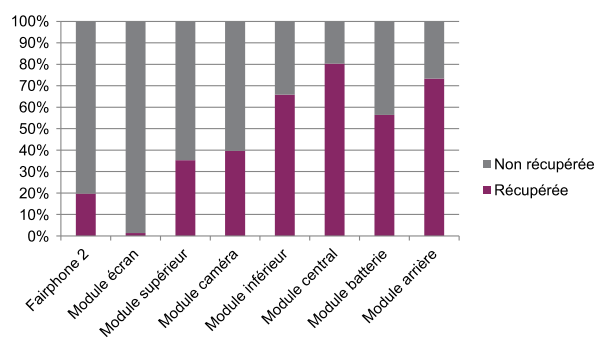


Figure 76. Troisième scénario.

Pertinence économique du traitement du Fairphone 2® et de ses modules

Les scénarios 1 (dépollution et récupération de matière par fusion) et 2 (démantèlement et récupération sélective de matière par fusion) ont pour but principal de récupérer les métaux précieux (c.-à-d. ceux qui ont un prix élevé). Nous nous attendons donc à ce que la pertinence économique de ces scénarios soit meilleure que celle du troisième scénario (broyage, prétraitement physique et métallurgie). Cependant, nous constatons que la pertinence économique des trois scénarios est très proche (environ 20%) (voir tableau 99).

	Récupérée (%)	Non récupérée (%)
Premier scénario	20,13	79,87
Deuxième scénario	19,96	80,04
Troisième scénario	19,72	80,28

Tableau 99. Pertinence économique du traitement. Comparaison entre scénarios

4.4.3. Évaluation de la pertinence environnementale du traitement

Nous ne disposons pas de toutes les données environnementales pour les trois scénarios, c'est pourquoi, la validation de la méthode d'évaluation de la valorisabilité sera réalisée uniquement sur les dimensions technique et économique.

4.4.4. Évaluation de l'indice de valorisabilité du produit (agrégation des trois dimensions)

Les trois scénarios de fin de vie sont centrés sur la valorisation matière (notamment le recyclage) du Fairphone 2®. En effet, nous avons constaté lors de l'évaluation de la performance technique du traitement (voir § 4.4.1) que la réutilisation n'est prise en compte dans aucun scénario. C'est pourquoi, notre étude sera centrée sur la comparaison de la valorisabilité matière des trois scénarios.

Le calcul de l'indice agrégé s'appuie sur les valeurs des performances techniques, et des pertinences économique et environnementale. Pour que la valeur de référence soit la même pour toutes (référence égale à 1), une fonction de transformation doit être appliquée aux dimensions technique et économique tel que présenté dans le chapitre précédent (voir Chapitre 4, § 2.2.7). L'indice de valorisabilité du Fairphone 2® peut ensuite être calculé pour les trois scénarios modélisés comme présenté dans le tableau 100.

	Performance technique	Pertinence économique	Pertinence environnementale	Indice de valorisabilité	Classement
Premier scénario	1,90	1,80	-	2,61	3
Deuxième scénario	1,78	1,80	-	2,46	2
Troisième scénario	1,59	1,80	-	2,24	1

Tableau 100. Comparaison de la valorisabilité du produit par scénario

Le troisième scénario est ainsi le plus pertinent car il offre le meilleur équilibre entre les dimensions technique et économique.

4.5. Analyse des résultats

L'étude de cas a permis de valider l'importance d'une évaluation multidimensionnelle. En effet dans le rapport de recyclabilité de Fairphone®, il a été défini que le meilleur scénario de recyclage est le deuxième (c.-à-d. le démontage avec récupération sélective de matière par fusion). En effet, même s'il ne permet pas de récupérer le plus de matière (en masse), c'est celui qui permet d'en récupérer de meilleure qualité (Fairphone 2017). Notre étude a toutefois démontré que lorsque l'on prend aussi la dimension économique en compte, on s'aperçoit que les trois scénarios sont à égalité, contrairement à ce qui était attendu.

La comparaison des trois scénarios n'a pas permis de conclure sur l'utilité de la méthode d'agrégation en tant qu'outil d'aide à la décision en conception car dans ce cas particulier, on arrive à la même conclusion sans l'agrégation. Néanmoins pour montrer l'intérêt de la méthode, prenons à titre d'exemple le troisième scénario. Il a été identifié comme ayant la meilleure valorisabilité et il illustre à ce jour le traitement des smartphone en fin de vie par la filière des DEEE. Lorsqu'on analyse ce seul scénario, la comparaison se fait *entre composants*. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau 101.

	Performance technique	Pertinence économique	Pertinence environnementale	Indice de valorisabilité	Classement
Module écran	1,71	1,99	-	2,62	7
Module supérieur	1,78	1,65	-	2,28	6
Module caméra	1,79	1,60	-	2,25	5
Module inférieur	1,55	1,34	-	1,73	3
Module central	1,44	1,20	-	1,50	2
Module batterie	1,70	1,44	-	1,98	4
Module arrière	1,24	1,27	-	1,39	1

Tableau 101. Valorisabilité du produit. Comparaison entre composants du troisième scénario

L'agrégation des indicateurs permet de valider l'intérêt du score agrégé comme outil d'aide à la décision en conception, la comparaison entre scénarios n'étant faite que sur la valeur agrégée. Pour valider enfin l'indice d'agrégation de Maurin, une comparaison avec les résultats obtenus en utilisant la moyenne comme fonction d'agrégation est proposée dans le tableau 102.

	Indice de valorisabilité	Classement (Indice)	Moyenne	Classement (Moyenne)
Module écran	2,62	7	1,85	7
Module supérieur	2,28	6	1,71	6
Module caméra	2,25	5	1,70	5
Module inférieur	1,73	3	1,45	3
Module central	1,50	2	1,32	2
Module batterie	1,98	4	1,57	4
Module arrière	1,39	1	1,25	1

Tableau 102. Comparaison des méthodes d'agrégation

On observe que le même classement est obtenu par les deux méthodes (ce qui n'est pas nécessairement le cas). Ce résultat ne nous permet pas de valider la méthode d'agrégation proposée.

Pour démontrer enfin les limites de la fonction moyenne en tant que méthode d'agrégation, regardons l'exemple du tableau 103.

	Performance technique	Pertinence économique	Indice de valorisabilité	Classement (Indice)	Moyenne	Classement (Moyenne)
Composant A	2,00	1,00	2,00	2	1,50	1
Composant B	1,50	1,50	1,83	1	1,50	1

Tableau 103. Exemple de validation de la méthode d'agrégation

L'intérêt de la méthode d'agrégation de Maurin est bien mis en évidence. En effet, on peut observer qu'alors que la fonction moyenne permet d'obtenir la même valeur pour les composants A et B, la fonction de Maurin permet d'identifier clairement que le composant A est moins valorisable que le B, la performance d'une de ses dimensions étant très éloignée de sa valeur de référence. Ce constat permet donc de valider l'utilisation de cette fonction d'agrégation dans notre indice de valorisabilité.

Enfin, les indicateurs d'efficacité potentielle de valorisation ont montré tout leur intérêt car ils permettent d'analyser l'efficacité de chaque voie de valorisation de façon indépendante. Dans ce cadre, l'efficacité potentielle du recyclage s'avère de grande importance pour le concepteur, alors que celles de la valorisation énergétique et de l'élimination sont moins concluantes. Elles pourraient cependant être intéressantes pour les acteurs de la filière lorsqu'ils cherchent à améliorer leurs procédés et à réduire les pertes.

En outre, nous avons aussi constaté que le taux de réutilisabilité (voir même le taux de valorisation fonctionnelle de façon plus générale) utilisé dans l'évaluation conventionnelle de la valorisabilité est peu utile pour le concepteur. En effet, le taux de valorisabilité fonctionnelle du Fairphone 2® est égal à zéro même en étant conçu pour être valorisé fonctionnellement.

5. Validation de l'outillage des lignes directrices d'écoconception comme outil d'aide à la décision en conception

La validation de l'outillage des lignes directrices d'écoconception sera faite dans un premier temps à partir de l'analyse de la performance du Fairphone® vis-à-vis des leviers d'action associés à la valorisabilité fonctionnelle et dans un deuxième temps par rapport à ceux associés à la valorisabilité matière.

Le Fairphone 2® a été conçu de façon modulaire pour le rendre facilement réparable et susceptible de monter en gamme, et prolonger ainsi sa durée de vie. Nous espérons donc trouver un bon score sur la valorisation fonctionnelle. En revanche, nous attendons un score plus faible pour la valorisation matière.

5.1. Évaluation de la performance du produit vis-à-vis d'une valorisation fonctionnelle

Il a été identifié précédemment que lors que l'on souhaite améliorer la valorisation fonctionnelle d'un produit les leviers d'action à disposition du concepteur sont ceux rappelés à la figure 77.

Pour définir quels leviers utiliser, les indicateurs de performance associés aux leviers d'action (proposés dans le chapitre précédent) doivent être calculés. Ils sont utilisés dans la suite pour évaluer la performance du Fairphone 2® au regard de sa valorisation fonctionnelle.

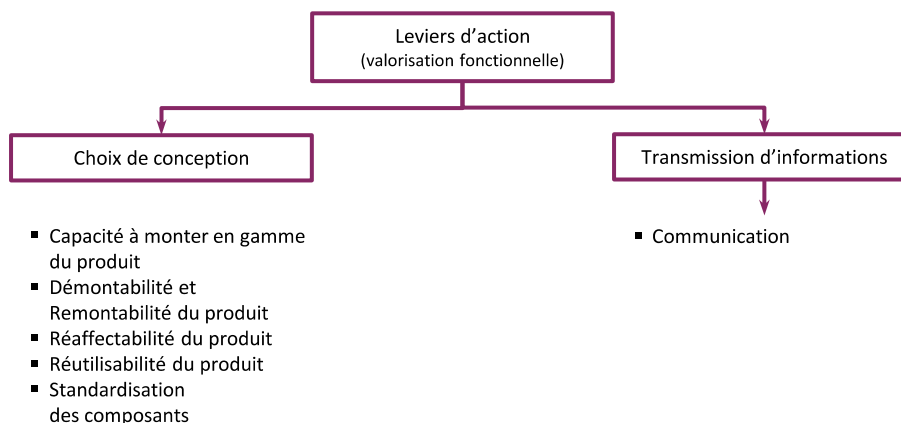


Figure 77. Représentation synoptiques des leviers d'action identifiés pour la valorisation fonctionnelle

5.1.1. Démontabilité du produit

La démontabilité du produit a été définie dans le chapitre précédent comme le regroupement de quatorze leviers d'action suivants (voir chapitre 4, figure 55) :

- accessibilité aux composants (§ 5.1.1.1) ;
- accessibilité aux fixations (§ 5.1.1.2) ;
- complexité du produit (§ 5.1.1.3) ;
- complexité du système de câblage (§ 5.1.1.4) ;
- complexité du système de fixations (§ 5.1.1.5) ;
- démontabilité des composants (§ 5.1.1.6) ;
- démontabilité des fixations (§ 5.1.1.7) ;
- diversité des fixations (§ 5.1.1.8) ;

- diversité d'outils de (dé)montage (§ 5.1.1.9) ;
- durabilité des fixations (§ 5.1.1.10) ;
- modularité du produit (§ 5.1.1.11) ;
- réparabilité des composants (§ 5.1.1.12) ;
- réparabilité des fixations (§ 5.1.1.13) ;
- standardisation d'outils de (dé)montage (§ 5.1.1.14).

Le score de performance de démontabilité d'un produit est ainsi défini comme la moyenne des quatorze scores de performance des indicateurs associés aux leviers d'actions mentionnés ci-dessus. Les indicateurs sont calculés dans les paragraphes suivants et une synthèse en sera proposée au § 5.1.1.15.

5.1.1.1. Accessibilité aux composants

L'accessibilité de chaque composant a été évaluée en analysant la séquence de démontage présentée dans la figure 63. Nous avons fait les constats suivants :

- l'étape 1 a pour objectif d'enlever le module arrière (c.-à-d. la coque). On note à la figure 63a que la coque a une accessibilité directe ;
- l'étape 2 vise à enlever le module batterie. Lors de cette étape, la batterie a une accessibilité directe (figure 63b) ;
- l'étape 3 a pour but est de séparer l'écran du reste. L'écran a une accessibilité directe (figure 63c) ;
- enfin, l'étape 4 vise à séparer les modules supérieur, caméra et inférieur du module central. Les modules supérieur, caméra et inférieur ont une accessibilité directe. En revanche, le module central est moins accessible, puisqu'il faut démonter les trois autres modules pour pouvoir accéder au composant (figure 63d).

Les scores d'accessibilité attribués à chaque module et pour l'ensemble des modules du Fairphone 2® sont calculés au tableau 104.

Accessibilité	α_c	A_c
Module écran	1,00	
Module supérieur	1,00	
Module caméra	1,00	
Module inférieur	1,00	0,93
Module central	0,50	
Module batterie	1,00	
Module arrière	1,00	

Tableau 104. Accessibilité aux composants

La valeur fournie par l'indicateur d'accessibilité aux composants est très proche de 1 (meilleur score possible) ce qui indique que les composants sont facilement accessibles.

5.1.1.2. Accessibilité aux fixations

L'accessibilité à chaque fixation a été évaluée en analysant la séquence de démontage également présentée dans la figure 63. Nous avons fait les constats suivants :

- le Fairphone 2® utilise onze fixations pour lier ses modules. Il y en a deux lors de l'étape 3 et neuf dans l'étape 4 (voir figure 78) ;

- la coque en plastique et la batterie sont fixées au reste du téléphone par pression (la coque grâce au bord en TPU, et la batterie par la forme du téléphone). Ces deux éléments n'ont donc pas été retenus dans cette analyse ;
- l'accessibilité à toutes les fixations est ensuite directe lors de leur étape de démontage associée.

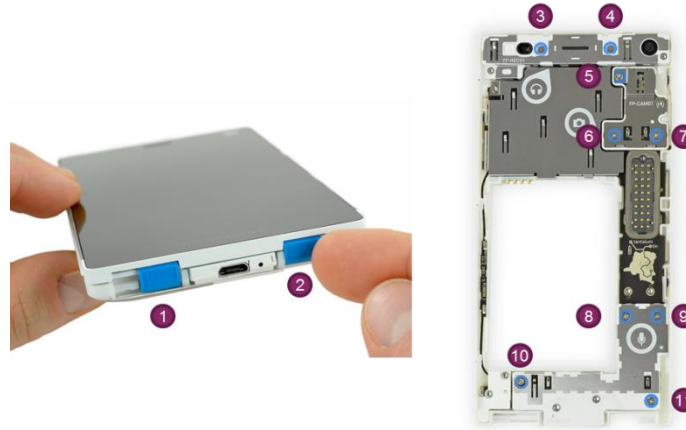


Figure 78. Fixations des modules du Fairphone 2®

Les scores d'accessibilité attribués à chaque fixation et à l'ensemble des fixations du Fairphone 2® sont calculés au tableau 105.

Accessibilité	a_f	A_f
Fixation 1	1,00	
Fixation 2	1,00	
Fixation 3	1,00	
Fixation 4	1,00	
Fixation 5	1,00	
Fixation 6	1,00	1,00
Fixation 7	1,00	
Fixation 8	1,00	
Fixation 9	1,00	
Fixation 10	1,00	
Fixation 11	1,00	

Tableau 105. Accessibilité aux fixations

L'indicateur d'accessibilité aux fixations indique que toutes les fixations sont parfaitement accessibles (indicateur égal à 1).

5.1.1.3. Complexité du produit

La complexité du produit a été définie comme inversement proportionnelle au nombre de composants qui le composent (voir Chapitre 4, § 2.3.2.2.3.3). Nous avons ainsi constaté lors de la caractérisation du Fairphone 2® (§ 2) qu'il est constitué de sept modules. L'indicateur de complexité du produit vaut donc :

$$Co_p = 0,45$$

La complexité du produit est moyenne. Ce résultat est bien cohérent car même s'il a été conçu de façon modulaire (et donc avec peu de sous-ensembles), le smartphone reste un produit complexe du fait de sa compacité, du nombre élevé de matériaux le constituant et des technologies high-tech utilisées.

5.1.1.4. Complexité du système de câblage

La complexité du système de câblage a été définie comme inversement proportionnelle au nombre de câbles qui le composent. À partir de la séquence de démontage présentée dans la figure 63, nous avons constaté que le Fairphone 2® contient uniquement deux câbles localisés dans le module central (voir figure 79). L'ensemble des modules sont connectés en utilisant des connecteurs *pogo pin* (contacts ressort sans câble ni support).

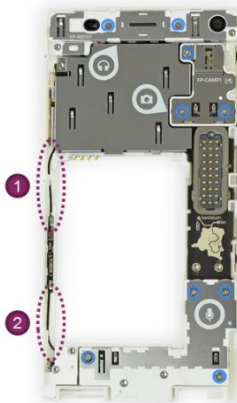


Figure 79. Câbles du Fairphone 2®

L'indicateur de complexité du système de câblage vaut donc :

$$Co_{sc} = 0,71$$

Il est relativement élevé, ce qui signifie bien que le système de fixation est simple.

5.1.1.5. Complexité du système de fixations

La complexité du système de fixation a été définie comme inversement proportionnelle au nombre de fixations. Nous avons constaté précédemment qu'il y a onze fixations (voir figure 78). L'indicateur de complexité du système de fixation vaut donc :

$$Co_{sf} = 0,31$$

Cette valeur est plutôt faible ce qui veut dire qu'il y a trop de fixations ; le système est donc de ce point de vue complexe.

5.1.1.6. Démontabilité des composants

La démontabilité d'un composant a été définie de façon inversement proportionnelle à un score de temps. Le tableau 106 contient pour chaque composant :

- le temps de démontage partiel (c.-à-d. le temps nécessaire pour enlever uniquement le composant) ;
- le temps de démontage total (c.-à-d. le temps depuis le début de la séquence de démontage) ;
- le score de temps (attribué pour chaque composant en de son temps de démontage total) ;
- le score de démontabilité du composant.

Démontabilité	t_{dpc}	t_{dtc}	s_t	d_c	D_c
Module arrière	10	10	1	1,00	0,76
Module batterie	2	12	1	1,00	
Module écran	10	22	1	1,00	
Module supérieur	35	57	1	1,00	
Module caméra	50	72	2	0,50	
Module inférieur	65	87	2	0,50	
Module central	0	172	3	0,33	

Tableau 106. Démontabilité des composants

La valeur de l'indicateur se trouve dans le quart des valeurs les plus élevées : les composants du Fairphone 2® ont donc bien une très bonne démontabilité.

5.1.1.7. Démontabilité des fixations

La démontabilité de chaque fixation est définie en fonction de leur nature tel que proposé dans le chapitre précédent (voir Chapitre 4, § 2.3.2.2.3.7). On observe dans la figure 78 que

- les fixations 1 et 2 sont des glissières dont le mécanisme de fixation correspond au type *encliquetage* ;
- le reste des fixations consiste en des vis.

Le tableau 107 liste les scores de démontabilité de chaque fixation et celui de l'ensemble des fixations du Fairphone 2®.

Démontabilité	d_f	D_f
Fixation 1	0,73	0,62
Fixation 2	0,73	
Fixation 3	0,60	
Fixation 4	0,60	
Fixation 5	0,60	
Fixation 6	0,60	
Fixation 7	0,60	
Fixation 8	0,60	
Fixation 9	0,60	
Fixation 10	0,60	
Fixation 11	0,60	

Tableau 107. Démontabilité des fixations

La valeur fournie par l'indicateur est supérieure à 0,5 ; les fixations sont assez faciles à démonter, mais d'autres types de liaisons pourraient être souhaités pour faciliter le désassemblage.

5.1.1.8. Diversité des fixations

La diversité des fixations a été définie comme inversement proportionnelle au nombre de types de fixation qui la composent. Nous avons constaté précédemment que le système de fixation en est constitué de deux types seulement (voir figure 78). L'indicateur de complexité du système de fixation vaut donc :

$$Di_f = 0,5$$

Cette valeur est au milieu de notre fourchette d'évaluation. Ce résultat pourrait surprendre car l'idéal étant d'avoir un seul type de fixation, en avoir deux types seulement semble un excellent compromis. Cependant, l'indicateur vise à pénaliser fortement chaque nouveau type de fixation.

5.1.1.9. Diversité d'outils de (dé)montage

La diversité d'outils de démontage a été définie comme inversement proportionnelle au nombre de types d'outils nécessaires. À partir de la séquence de démontage présentée dans la figure 63 , nous avons constaté que :

- les fixations 1 et 2 sont des glissières dont le démontage est fait manuellement (c.-à-d. aucun outil n'est nécessaire pour ces fixations) ;
- le reste de fixations sont des vis pour lesquelles l'outil nécessaire est un tournevis.

Le Fairphone 2® a donc besoin d'un seul outil de démontage.

L'indicateur de diversité d'outils de démontage fournit ainsi la valeur suivante :

$$Di_{to} = 1$$

C'est évidemment le meilleur score possible. Le produit n'a donc aucune diversité d'outils de démontage.

5.1.1.10. Durabilité des fixations

La durabilité des fixations vise à évaluer si les fixations sont protégées contre la corrosion et l'usure. La valeur attribuée à chaque fixations est définie tel que proposé dans le chapitre précédent (voir chapitre 4, § 2.3.2.2.3.10). À partir de la séquence de démontage présentée dans la figure 63 , nous avons constaté que :

- les fixations 1 et 2 sont protégées par le module arrière (c.-à-d. la coque en plastique) ;
- les autres fixations sont doublement protégées. D'une part, elles sont situées au milieu du téléphone (c.-à-d. entre le module écran et l'ensemble contenant le module central, supérieur, caméra et inférieur). D'autre part, le module arrière enveloppe et protège la zone d'assemblage des deux ensembles.

Les scores de durabilité attribués à chaque fixation et à l'ensemble des fixations du Fairphone 2® sont calculés au tableau 108.

Durabilité	du_f	Du_f
Fixation 1	1,00	
Fixation 2	1,00	
Fixation 3	1,00	
Fixation 4	1,00	
Fixation 5	1,00	
Fixation 6	1,00	1,00
Fixation 7	1,00	
Fixation 8	1,00	
Fixation 9	1,00	
Fixation 10	1,00	
Fixation 11	1,00	

Tableau 108. Durabilité des fixations

L'indicateur fournit le meilleur score possible, ce qui veut dire que les fixations du produit sont bien protégées contre la corrosion et l'usure, ainsi que du vieillissement du produit.

5.1.1.11. Modularité du produit

La complexité du produit a été définie comme le rapport entre le nombre des modules et le nombre des fonctions du produit (voir Chapitre 4, § 2.3.2.2.3.11). En s'appuyant sur la liste des composants principaux

présentée dans le rapport Fraunhofer (Fraunhofer IZM 2016), nous avons pu identifier les fonctions prises en charge par chaque module (voir tableau 109).

Module	Fonction(s) prise(s) en charge
Module écran	Affichage
Module supérieur	Caméra frontale Récepteur (haut-parleur)
Module caméra	Caméra principale
Module inférieur	Microphone Haut-parleur Communication et recharge (USB) Vibration
Module central	Carte mère Antennes
Module batterie	Batterie
Module arrière	Protection

Tableau 109. Modules et fonctions du Fairphone 2®

Nous identifions ainsi douze fonctions prises en charge par les sept modules. L'indicateur de modularité du produit fourni donc la valeur suivante :

$$M_p = 0,58$$

Cette valeur indique que le produit est moyennement modulaire. Ce résultat n'était pas attendu car le Fairphone 2® est pourtant conçu pour l'être. Ce résultat s'explique toutefois par le fait que le meilleur score peut être obtenu lorsqu'il y a une seule fonction par module. Les trois principaux modules (central, supérieur et inférieur) en regroupent plusieurs, ce qui fait naturellement chuter le score.

5.1.1.12. Repérabilité des composants

La repérabilité des composants est définie selon le pourcentage de surface visible (dans le sens du démontage) tel que défini dans le chapitre précédent (voir Chapitre 4, § 2.3.2.2.3.12). La repérabilité de chaque composant a été évaluée en analysant la séquence de démontage présentée dans la figure 63 :

- l'étape 1 a pour objectif d'enlever le module arrière (c.-à-d. la coque). Elle est visible à 100 % (voir figure 63a) ;
- l'étape 2 permet d'enlever le module batterie. Elle est alors visible à 100 % (figure 63b) ;
- l'étape 3 a pour but est de séparer l'écran du reste. Il est visible à 100 % (figure 63c) ;
- enfin, l'étape 4 vise à séparer les modules supérieur, caméra et inférieur du module central. Dans cette étape (figure 63d), les modules supérieur, caméra et inférieur sont visibles à 100 %. En revanche, le module central est occulté (puisque'il faut démonter les trois autres modules pour pouvoir accéder au composant), mais reste visible à plus de 50 %.

Les résultats de cette analyse sont classés au tableau 110 par score de repérabilité attribué à chaque module et à l'ensemble des modules du Fairphone 2®.

La valeur fournie par l'indicateur de repérabilité des composants est très proche de 1 (meilleur score possible) ce qui indique que les composants sont presque tous parfaitement repérables.

Repérabilité	rp_c	Rp_c
Module écran	1,00	
Module supérieur	1,00	
Module caméra	1,00	
Module inférieur	1,00	0,93
Module central	0,50	
Module batterie	1,00	
Module arrière	1,00	

Tableau 110. Repérabilité des composants

5.1.1.13. Repérabilité des fixations

La repérabilité des fixations est définie selon le pourcentage de surface visible (dans le sens du démontage) tel que défini dans le chapitre précédent (voir Chapitre 4, § 2.3.2.2.3.13). La repérabilité de chaque fixation a été évaluée en analysant la séquence de démontage présentée dans la figure 63 :

- les fixations 1 et 2 sont visibles à 100 % (voir figure 63c) ;
- le reste des fixations est aussi visible à 100 % lors de leur étape de démontage (voir figure 63d)
- Enfin, les fixations sont signalées en bleu (voir figure 78). D'une part, les fixations 1 et 2 sont en plastique bleu ce qui contraste avec la couleur blanche des modules. D'autre part, un cercle bleu entoure le reste des fixations ce qui permet de les repérer rapidement.

Dans le tableau 111, les scores de repérabilité attribués à chaque fixation à l'ensemble des fixations du Fairphone 2® sont recensés.

Repérabilité	rp_f	Rp_f
Fixation 1	1,00	
Fixation 2	1,00	
Fixation 3	1,00	
Fixation 4	1,00	
Fixation 5	1,00	
Fixation 6	1,00	1,00
Fixation 7	1,00	
Fixation 8	1,00	
Fixation 9	1,00	
Fixation 10	1,00	
Fixation 11	1,00	

Tableau 111. Repérabilité des fixations

La valeur fournie par l'indicateur indique que toutes les fixations sont parfaitement repérables (car valeur égale à 1).

5.1.1.14. Standardisation d'outils de (dé)montage

La standardisation des outils de (dé)montage est définie par différents critères : d'abord si un outil de démontage est nécessaire, puis s'il est standard ou spécifique (voir Chapitre 4, § 2.3.2.2.3.14). À partir de la séquence de démontage présentée dans la figure 63, nous avons fait les constats suivants :

- les fixations 1 et 2 sont démontées manuellement (voir figure 63c). Il n'y a pas donc besoin d'aucun outil de démontage ;

- les autres fixations sont démontées en utilisant un tournevis Phillips n° 0. Les fixations 3 à 11 ont donc besoin d'un outil de démontage standard (voir figure 63d).

Standardisation	s_f	S_f
Fixation 1	1,00	
Fixation 2	1,00	
Fixation 3	0,80	
Fixation 4	0,80	
Fixation 5	0,80	
Fixation 6	0,80	0,84
Fixation 7	0,80	
Fixation 8	0,80	
Fixation 9	0,80	
Fixation 10	0,80	
Fixation 11	0,80	

Tableau 112. Standardisation des fixations

La valeur fournie par l'indicateur se trouve dans le quart des valeurs le plus élevées ce qui veut dire que les fixations du produit sont bien standards.

5.1.1.15. Synthèse des résultats et conclusions sur la démontabilité du Fairphone 2® et de ses composants

La synthèse des résultats précédents est présentée à la figure 80.

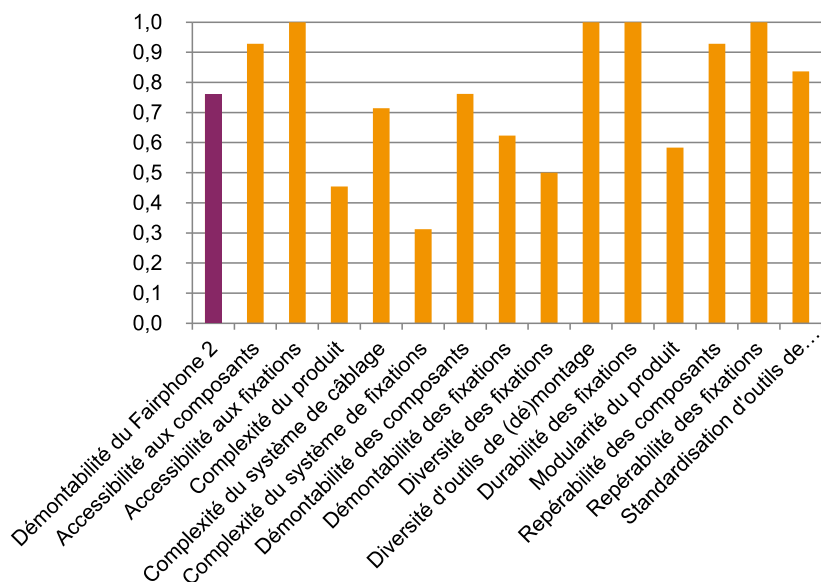


Figure 80. Démontabilité du Fairphone 2®

Ce score se trouve dans le quart des valeurs le plus élevées (entre 0,75 et 1). Cela signifie qu'il a une très bonne démontabilité. Ce résultat est cohérent avec le produit analysé car il a été conçu pour être démonté facilement.

5.1.2. Remontabilité du produit

La remontabilité du produit a été définie de façon similaire à la démontabilité (voir chapitre 4, § 2.3.2.2.3). Elle est ainsi construite à partir du regroupement de quatorze leviers d'action dont seuls la remontabilité des composants et la remontabilité des fixations diffèrent par rapport à la démontabilité. Les leviers d'action utilisés sont ainsi

- accessibilité aux composants (§ 5.1.1.1) ;
- accessibilité aux fixations (§ 5.1.1.2) ;
- complexité du produit (§ 5.1.1.3) ;
- complexité du système de câblage (§ 5.1.1.4) ;
- complexité du système de fixations (§ 5.1.1.5) ;
- diversité des fixations (§ 5.1.1.8) ;
- diversité d'outils de (dé)montage (§ 5.1.1.9) ;
- durabilité des fixations (§ 5.1.1.10) ;
- modularité du produit (§ 5.1.1.11) ;
- remontabilité des composants (§ 5.1.2.1) ;
- remontabilité des fixations (§ 5.1.2.2) ;
- réparabilité des composants (§ 5.1.1.12) ;
- réparabilité des fixations (§ 5.1.1.13) ;
- standardisation d'outils de (dé)montage (§ 5.1.1.14).

Le score de performance de remontabilité d'un produit est également défini comme la moyenne des quatorze scores de performance des indicateurs associés aux leviers d'actions mentionnés ci-dessus. Seuls les calculs des scores de remontabilité des composants et des fixations seront détaillés dans la suite. En effet, nous rappelons que les autres calculs sont les mêmes que ceux effectués pour la démontabilité.

Les indicateurs sont ainsi calculés dans les paragraphes suivants et une synthèse en sera proposée au § 5.1.2.3.

5.1.2.1. Remontabilité des composants

La remontabilité d'un composant a été définie par son score de démontabilité multiplié par un facteur de remontabilité (voir chapitre 4, § 2.3.2.2.3.6). À partir de la séquence de démontage présentée dans la figure 63, nous avons fait les constats suivants :

- l'étape 1 est réversible et le module arrière n'est pas endommagé lors de son démontage (figure 63a) ;
- l'étape 2 est réversible et la batterie n'est pas endommagée lors de son démontage (figure 63b) ;
- l'étape 3 est réversible, et ni le module écran ni l'ensemble contenant le reste des modules ne sont endommagés lors du démontage (figure 63c) ;
- les trois opérations de démontage possibles dans l'étape 4 sont réversibles et aucun des modules n'est endommagé lors de cette opération (figure 63d).

Le tableau 113 présente les scores de remontabilité obtenus pour chaque module et la synthèse pour l'ensemble du Fairphone 2®.

La valeur se trouve dans le quart des valeurs le plus élevées : les composants du produit ont une très bonne remontabilité. Puisque le facteur de remontabilité des composants est égal à 1 pour chaque composant, le score de remontabilité est le même que celui de la démontabilité. Ce résultat est parfaitement cohérent car le produit a été conçu pour être aussi facilement désassemblé que réassemblé.

Remontabilité	d_c	frm_c	rm_c	Rm_c
Module arrière	1,00	1,00	1,00	
Module batterie	1,00	1,00	1,00	
Module écran	1,00	1,00	1,00	
Module supérieur	1,00	1,00	1,00	0,76
Module caméra	0,50	1,00	0,50	
Module inférieur	0,50	1,00	0,50	
Module central	0,33	1,00	0,33	

Tableau 113. Remontabilité des composants

5.1.2.2. Remontabilité des fixations

La remontabilité d'une fixation a été définie par son score de démontabilité multiplié par un facteur de remontabilité (lequel est défini en fonction de la réversibilité du démontage) (voir Chapitre 4, § 2.3.2.2.3.7). À partir de la séquence de démontage présentée dans la figure 63, nous avons fait les constats suivants :

- le démontage des fixations 1 et 2 est réversible et elles ne sont pas endommagées lors de l'opération (voir figure 63c) ;
- le démontage du reste de fixations est réversible et elles ne sont pas endommagées lors de l'opération (voir figure 63d).

Le tableau 114 présente les résultats pour chaque fixation et la synthèse pour l'ensemble du Fairphone 2®.

Remontabilité	d_f	frm_f	rm_c	Rm_c
Fixation 1	0,73	1,00	0,73	
Fixation 2	0,73	1,00	0,73	
Fixation 3	0,60	1,00	0,60	
Fixation 4	0,60	1,00	0,60	
Fixation 5	0,60	1,00	0,60	
Fixation 6	0,60	1,00	0,60	0,62
Fixation 7	0,60	1,00	0,60	
Fixation 8	0,60	1,00	0,60	
Fixation 9	0,60	1,00	0,60	
Fixation 10	0,60	1,00	0,60	
Fixation 11	0,60	1,00	0,60	

Tableau 114. Remontabilité des fixations

La valeur est supérieure à 0,5 : les fixations sont relativement faciles à remonter. De même que pour la démontabilité des composants, il peut être observé ici que comme le facteur de remontabilité est égale à 1 pour toutes les fixations, le score de remontabilité et démontabilité sont égaux.

5.1.2.3. Synthèse des résultats et conclusions sur la remontabilité du Fairphone 2® et de ses composants

La synthèse des résultats précédents est présentée à la figure 81.

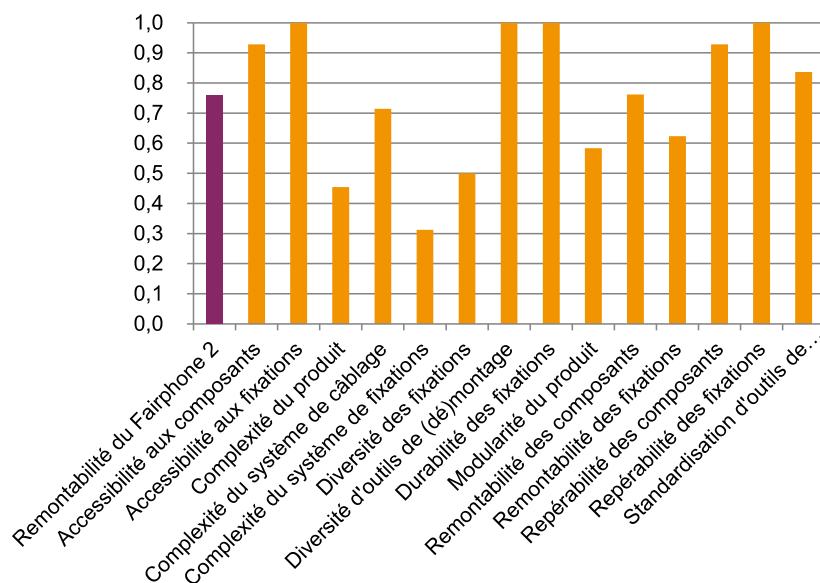


Figure 81. Remontabilité du Fairphone 2®

Le score du Fairphone 2® se trouve dans le quart des valeurs le plus élevées, ce qui signifie qu'il a une très bonne remontabilité. Ce résultat est cohérent avec le produit analysé car il a été conçu pour être démonté et remonté facilement.

5.1.3. Capacité à monter en gamme du produit

Fairphone® a proposé la possibilité de monter en gamme des deux modules contenant les caméras du Fairphone 2® :

- module caméra, le module de base avait une caméra de 8 MP avec flash et le nouveau module propose une caméra de 12 MP avec double flash ;
- module supérieur, le module de base avait une caméra de 2 MP, alors que le nouveau module propose une caméra de 5 MP.

(Fairphone s. d.).

Le module arrière peut aussi monter en gamme car différents modèles de coque (couleurs) sont disponibles en ligne ; l'utilisateur peut ainsi changer l'apparence de son smartphone.

À partir de ces informations, nous avons pu définir la masse du produit pouvant conceptuellement monter en gamme pour en déduire ensuite la capacité conceptuelle à monter en gamme (voir tableau 115).

Capacité à monter en gamme		m_{amgc}^i (g)	m_{pmgc} (g)	m_p (g)	τ'_{mgc}
Module écran	non	0,0			
Module supérieur	oui	6,5			
Module caméra	oui	3,8			
Module inférieur	non	0,0	30,4	170,1	0,18
Module central	non	0,0			
Module batterie	non	0,0			
Module arrière	oui	20,1			

Tableau 115. Capacité à monter en gamme

La valeur de l'indicateur se trouve dans le quart des valeurs les plus faibles, ce qui signifie que le produit a une capacité à monter en gamme très limitée.

5.1.4. Réaffectabilité du produit

L'une des politiques de Fairphone® est de prolonger la durée de vie de ses produits pour réduire l'impact environnemental. À ce jour, les seules voies de traitement envisagées pour une valorisation fonctionnelle sont la montée en gamme et le reconditionnement.

Nous avons donc calculé le taux de réaffectabilité conceptuelle (voir tableau 116).

Réaffectabilité		m_{arac}^i (g)	m_{prac} (g)	m_p (g)	τ'_{rac}
Module écran	non	0,0			
Module supérieur	non	0,0			
Module caméra	non	0,0			
Module inférieur	non	0,0	0,0	170,1	0,00
Module central	non	0,0			
Module batterie	non	0,0			
Module arrière	non	0,0			

Tableau 116. Réaffectabilité du produit

L'indicateur fournit le pire score possible (c.-à-d. réaffectabilité nulle). Ce résultat était attendu puisque la réaffectation n'est pas une voie de traitement initialement envisagée pour le Fairphone 2®.

5.1.5. Réutilisabilité du produit

Fairphone® a valorisé fonctionnellement certains de ses smartphones et créé une version appelée *Fairphone 2 : Édition nouvelle vie*®. Dans ce cadre, ils ont précisé qu'un faible pourcentage de téléphones est retourné en usine (pour défaillance technique ou dommage esthétique) : ils y ont été remis à neuf (les pièces endommagées sont remplacées par des pièces neuves) et testés pour assurer le respect des conditions d'origine. De plus, une batterie neuve est fournie et les dernières mises à jour logicielles sont chargées. (Fairphone 2019b)

À partir de ces informations, nous avons défini la masse du produit conceptuellement réutilisable qui nous a servi ensuite pour calculer le taux de réutilisabilité conceptuelle (voir tableau 117).

Réutilisabilité		m_{arac}^i (g)	m_{prac} (g)	m_p (g)	τ'_{rac}
Module écran	oui	52,5			
Module supérieur	oui	6,5			
Module caméra	oui	3,8			
Module inférieur	oui	9,2	132,1	170,1	0,78
Module central	oui	40,0			
Module batterie	non	0,0			
Module arrière	oui	20,1			

Tableau 117. Réutilisabilité du produit

La valeur de l'indicateur se trouve dans le quart des valeurs le plus élevées : le produit présente une très bonne réutilisabilité.

5.1.6. Standardisation des composants

Pour un smartphone, la standardisation des composants concerne uniquement ceux ayant une interaction avec d'autres communs à d'autres téléphones. Les composants concernés sont ainsi le port USB, le port des cartes SIM et la prise pour les casques audio. Le Fairphone 2® utilise ainsi :

- un port USB micro-B 2.0 (Fairphone 2015). C'est le type de port le plus répandu sur la plupart des smartphones. Le composant a donc été classé comme standard ;
- deux ports micro-SIM (Fairphone 2015). Il y a trois types de carte SIM standard (15 × 25 mm), micro (12 × 15 mm) et nano (8,8 × 12,3 mm). Malgré le nom du premier, les trois types sont considérés comme standards, car seule leur taille a été réduite au fil du temps (les nano-SIM sont les plus utilisées aujourd'hui). Le composant a donc été classé comme standard ;
- une prise jack de 3,5 mm (Fairphone 2015). Ce type de prise est le plus utilisé pour les casques audio. Le composant a donc été classé comme standard.

À partir de ces informations, nous pouvons constater que le Fairphone 2® n'utilise que des composants standards. L'indicateur de standardisation des composants fournit donc la valeur suivante :

$$S_a = 1$$

C'est le meilleur score possible car les composants analysés sont standard, ce qui peut favoriser la valorisation fonctionnelle.

5.2. Évaluation de la performance du produit vis-à-vis de la valorisation matière

Il a été identifié précédemment que quand on souhaite améliorer la valorisation matière d'un produit, les leviers d'action à disposition du concepteur sont les suivants :

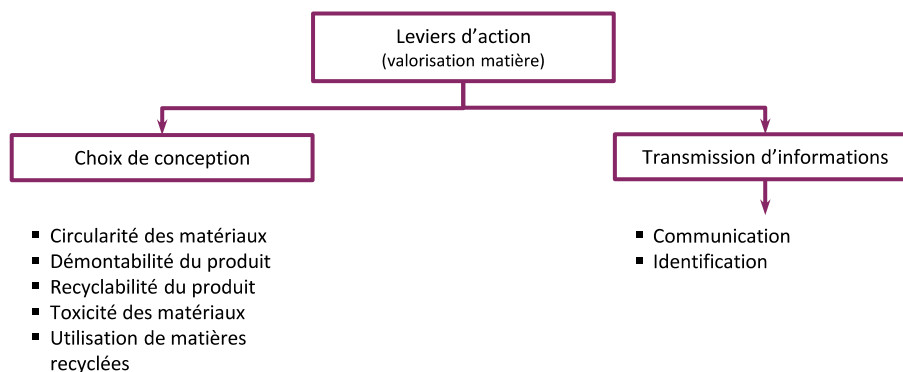


Figure 82. Représentation synoptique des leviers d'action identifiés pour la valorisation matière

De même que pour la valorisation fonctionnelle, pour savoir quels leviers d'action utiliser, les indicateurs de performance associés aux leviers d'action (proposés dans le chapitre précédent) doivent être évalués. Ces indicateurs sont utilisés dans la suite pour évaluer la performance du Fairphone 2® vis-à-vis de sa valorisation matière.

5.2.1. Circularité des matériaux

La circularité des matériaux est définie à partir du taux d'intrants du recyclage en fin de vie proposé par la Commission Européenne (voir Chapitre 4, § 2.3.2.2.2). Dans ce cadre, les éléments suivants ont été considérés :

- le rapport *Raw Materials Scoreboard* (European Commission et Directorate-General for Internal Market 2018) contient les taux de 59 éléments du tableau périodique et de 17 autres matériaux ;
- pour l'acier, l'ADEME précise que le taux d'incorporation d'acier recyclé en France était de 51 % en 2014 (ADEME 2019c) ;
- pour les plastiques, il est difficile d'estimer avec précision le taux d'incorporation de matériaux recyclés par les industries utilisatrices de plastiques à ce jour (ADEME et Bio by Deloitte 2017). La Commission Européenne précise toutefois que la demande de plastiques recyclés ne représente aujourd'hui qu'environ 6 % de la demande de plastiques en Europe (Commission Européenne 2018) ;
- pour le verre, l'ADEME précise que le taux d'incorporation de calcin en France a été de 58 % en 2014 (ADEME 2019c).

À partir de ces informations, nous avons construit le tableau 118.

Circularité	c_i	C_i
Acier inoxydable	0,51	
Fe (fer)	0,31	
Ag (argent)	0,55	
Al (aluminium)	0,12	
Au (or)	0,20	
Co (cobalt)	0,35	
Cu (cuivre)	0,17	
Cr (chrome)	0,21	
Mg (magnésium)	0,13	
Mn (manganèse)	0,12	
Ni (nickel)	0,34	
Pb (plomb)	0,75	
Pd (palladium)	0,09	
Pt (platine)	0,11	
Si (silicium)	0,00	
Sn (étain)	0,32	
W (tungstène)	0,42	
Zn (zinc)	0,31	
Gd (gadolinium)	0,01	
Nd (neodymium)	0,01	
Pr (praseodymium)	0,10	0,19
P (phosphore)	0,17	
PC (polycarbonate)	0,06	
PE (polyéthylène)	0,06	
PVC (polychlorure de vinyle)	0,06	
TPU (polyuréthane thermoplastique)	0,06	
PC Mix (polycarbonate + fibre de verre)	0,06	
PA Mix (polyamide + fibre de verre)	0,06	
Autres plastiques (COC, PSU et PBT*)	0,06	
Plastique non défini (ABS*)	0,06	
Caoutchouc	0,01	
Epoxy		
Polyimide (PI)		
Polymère à cristaux liquides (LCP)		
Verre	0,58	
Graphite	0,03	
Couche ITO		
Cristal liquide		
LCO		
LiPF6		

Tableau 118. Circularité des matériaux

Le tableau indique la circularité de chaque matériau du Fairphone 2® pour lesquels nous disposons d'informations (n'avons pas trouvé le taux d'incorporation des matériaux recyclés des autres constituants), ainsi que le score pour l'ensemble de ces matériaux. La valeur de l'indicateur se trouve dans le quart des valeurs les plus faibles ce qui indique que les matériaux utilisés dans le produit ont une faible circularité.

5.2.2. Démontabilité du produit

La démontabilité du produit est un levier d'action qui peut aussi bien être utilisé dans la valorisation fonctionnelle que dans la valorisation matière. Elle y est définie de la même manière (voir § 5.1.1).

Le score de démontabilité du Fairphone 2® pour la valorisation matière est donc toujours le même que celui présenté à la figure 80 : 0,76.

5.2.3. Recyclabilité du produit

La recyclabilité du produit a été définie dans le chapitre précédent par le regroupement de trois leviers d'action (voir Chapitre 4, § 2.3.2.2.8) :

- la compatibilité des matériaux ;
- la diversité des matériaux ;
- et la recyclabilité des matériaux.

Le score de recyclabilité du produit est ainsi défini comme la moyenne des trois scores de performance associés à ces leviers d'action. Les indicateurs sont ainsi calculés dans les paragraphes suivants et une synthèse en sera proposée au § 5.2.3.4.

5.2.3.1. Compatibilité des matériaux

La compatibilité entre deux matériaux a été définie vis-à-vis du recyclage (voir Chapitre 4, § 2.3.2.2.8.1). Dans ce cadre, les constats suivants ont été effectués :

- Pour les métaux, la compatibilité est abordée dans la littérature par la capacité de séparation des impuretés du matériau à recycler. Certains auteurs analysent les taux de distribution des impuretés entre les phases métal, *slag* et gaz en utilisant une carte radar à éléments (Hiraki et al. 2011; Reck et Graedel 2012). D'autres, utilisent la *roue de recyclage des métaux* qui décrit les diverses possibilités de perte et de récupération d'impuretés ainsi que les voies économiquement viables (Markus Reuter 2012; Markus Reuter, Schaik, et Ballester 2018) ;
- Pour les plastiques, la compatibilité est abordée au sens chimique, c'est-à-dire par la relation entre le matériau à recycler et les impuretés qui pourraient perturber son recyclage. Elle est représentée sous forme de matrice dans la littérature (Qian, Yu, et Zhang 2001; Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote, et al. 2007; Maier 2009). La matrice de Maier a été préférée car c'est plus récente et plus exhaustive. Les informations du site Eco3e sur ce qui est toléré, peu toléré et non toléré pour le recyclage en termes de concentration en fibres de verre a été utilisées pour analyser la compatibilité des plastiques PC Mix et PA Mix (Eco3e 2016).

En s'inspirant du mode de représentation utilisé pour les plastiques, l'ensemble des compatibilités ont été organisés sous forme de matrice. La figure 83 contient ainsi la matrice de compatibilité des matériaux du Fairphone 2®.

		Matériau complémentaire							
		PC (polycarbonate)	PE (polyéthylène)	PVC (polychlorure de vinyle)	TPU (polyuréthane thermoplastique)	PC Mix (polycarbonate + fibre de verre)	PA Mix (polyamide + fibre de verre)	Autres plastiques (COC, PSU et PBT*)	Plastique non défini (ABS*)
Matériau de base	PC (polycarbonate)	1	0,5	0	1	0,3	0	1	1
	PE (polyéthylène)	0,5	1	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5
	PVC (polychlorure de vinyle)	0	0,5	1	1	0	0	0	1
	TPU (polyuréthane thermoplastique)	0,5	0,5	1	1	0,3	0,3	0,5	1
	PC Mix (polycarbonate + fibre de verre)	1	0,5	0	1	1	0	1	1
	PA Mix (polyamide + fibre de verre)	0	0,5	0	1	0	1	0,5	0,5
	Autres plastiques (COC, PSU et PBT*)	1	0	0	0,5	0,3	0,3	1	1
	Plastique non défini (ABS*)	1	0	1	1	0,3	0,3	1	1

Compatibles	1
Compatibles dans des quantités limitées	0,5
Compatibles dans des petites quantités	0,3
Incompatibles	0

Figure 84. Matrice de compatibilité des plastiques du Fairphone 2®

On met ainsi en évidence deux sens de lecture pour l'analyse de la compatibilité :

- le premier sens correspond à la lecture en horizontale (voir figure 85a). Nous y retrouvons la compatibilité de notre matériau en tant que matériau de base (c.-à-d. matériau principal à recycler) ;
- le deuxième correspond au sens vertical (voir figure 85b). Nous y retrouvons la compatibilité de notre matériau en tant que matériau complémentaire (c.-à-d. comme une impureté qui pourrait compromettre le recyclage du matériau principal).

Matériau de base	Matériau complémentaire							
	PC (polycarbonate)	PE (polyéthylène)	PVC (polychlorure de vinyle)	TPU (polyuréthane thermoplastique)	PC Mix (polycarbonate + fibre de verre)	PA Mix (polyamide + fibre de verre)	Autres plastiques (COC, PSU et PBT)	Plastique non défini (ABS)
PC (polycarbonate)	1	0,5	0	1	0,3	0	1	1
PE (polyéthylène)	0,5	1	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5
PVC (polychlorure de vinyle)	0	0,5	1	1	0	0	0	1
TPU (polyuréthane thermoplastique)	0,5	0,5	1	1	0,3	0,3	0,5	1
PC Mix (polycarbonate + fibre de verre)	1	0,5	0	1	1	0	1	1
PA Mix (polyamide + fibre de verre)	0	0,5	0	1	0	1	0,5	0,5
Autres plastiques (COC, PSU et PBT)	1	0	0	0,5	0,3	0,3	1	1
Plastique non défini (ABS)	1	0	1	1	0,3	0,3	1	1

Matériau de base	Matériau complémentaire							
	PC (polycarbonate)	PE (polyéthylène)	PVC (polychlorure de vinyle)	TPU (polyuréthane thermoplastique)	PC Mix (polycarbonate + fibre de verre)	PA Mix (polyamide + fibre de verre)	Autres plastiques (COC, PSU et PBT)	Plastique non défini (ABS)
PC (polycarbonate)	1	0,5	0	1	0,3	0	1	1
PE (polyéthylène)	0,5	1	0,5	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5
PVC (polychlorure de vinyle)	0	0,5	1	1	0	0	0	1
TPU (polyuréthane thermoplastique)	0,5	0,5	1	1	0,3	0,3	0,5	1
PC Mix (polycarbonate + fibre de verre)	1	0,5	0	1	1	0	1	1
PA Mix (polyamide + fibre de verre)	0	0,5	0	1	0	1	0,5	0,5
Autres plastiques (COC, PSU et PBT)	1	0	0	0,5	0,3	0,3	1	1
Plastique non défini (ABS)	1	0	1	1	0,3	0,3	1	1

a. Compatibilité en tant que matériau de base

b. Compatibilité en tant que matériau complémentaire

Figure 85. Sens de lecture de la matrice de compatibilité des matériaux

Nous pouvons ainsi définir, pour chaque matériau, une compatibilité en tant que matériau de base (C_{mb}^i) et une autre en tant que matériau complémentaire (C_{mc}^i). Le score de compatibilité du matériau (C_m^i) est attribué en fonction du fait qu'il soit considéré comme un matériau de base ou comme un matériau complémentaire dans la filière de traitement correspondante. Lorsque l'on ne dispose pas de cette information, le pire de deux scores est retenu. Un score de compatibilité global (C_m) peut enfin être calculé comme la moyenne des compatibilités de tous les matériaux.

Dans le cadre de la filière des DEEE en France, il a été identifié que seuls le PP, l'ABS et le PS sont récupérés dans le flux des PAM (BLEU SAFRAN, HUGREL, et PALLUAU 2017). Tout autre matériau sera donc considéré comme complémentaire. Le tableau 119 contient l'ensemble des compatibilités des plastiques.

Compatibilité	C_{mb}^i	C_{mc}^i	C_m^i	C_m
PC (polycarbonate)	0,59	0,63	0,63	
PE (polyéthylène)	0,50	0,44	0,44	
PVC (polychlorure de vinyle)	0,44	0,44	0,44	
TPU (polyuréthane thermoplastique)	0,63	0,88	0,88	
PC Mix (polycarbonate + fibre de verre)	0,69	0,28	0,28	0,54
PA Mix (polyamide + fibre de verre)	0,44	0,25	0,25	
Autres plastiques (COC, PSU et PBT ¹)	0,50	0,69	0,69	
Plastique non défini (ABS ¹)	0,69	0,88	0,69	

Tableau 119. Compatibilité des matériaux

Il est possible d'observer dans le tableau 119 que bien que pour certains matériaux, les compatibilités C_{mb}^i et C_{mc}^i aient des valeurs similaires (p. ex. PC et PE) voir même égales (p. ex. PVC), des écarts importants peuvent exister pour d'autres. Si l'on prend par exemple le cas du PC Mix (PC renforcé en fibres de verre), nous pouvons clairement observer que sa compatibilité en tant que matériau de base est bonne mais celle en tant que matériau complémentaire est très basse. Ce constat met en évidence l'intérêt des deux sens de lecture de la compatibilité pour le concepteur : par exemple, sachant que la filière ne récupère pas le PC Mix, le matériau est à éviter car il risque de compromettre le recyclage d'autres plastiques.

Dans l'ensemble, l'indicateur de compatibilité des matériaux fourni un score légèrement supérieur à la valeur moyenne de notre fourchette (c.-à-d. 0,5). Les plastiques du Fairphone 2[®] sont ainsi faiblement compatibles entre eux.

5.2.3.2. Diversité des matériaux

La diversité des matériaux a été définie à partir d'une fonction inversement proportionnelle à l'entropie (voir Chapitre 4, § 2.3.2.2.8.2). L'entropie du téléphone est d'abord calculée à partir des concentrations des matériaux du Fairphone 2[®] (voir tableau 129) :

$$H = 3,38$$

Le score de compatibilité des matériaux est ensuite calculé :

$$D_m = 0,23$$

La valeur de l'indicateur se trouve dans le quart des valeurs les plus faibles ce qui indique que le produit a une grande diversité de matériaux.

5.2.3.3. Recyclabilité des matériaux

La recyclabilité des matériaux a été définie comme une fonction des taux de recyclage des matériaux et de

leurs taux de pureté (voir Chapitre 4, § 2.3.2.2.8.3). Pour obtenir ces taux, un scénario de fin de vie doit être défini. Parmi les scénarios de traitement envisagés, le troisième a été retenu car c'est celui qui correspond au traitement actuel des smartphones en fin de vie. Le taux de pureté a été fixée à 1 pour tous les matériaux car il n'y en avait pas d'informations pour ce scénario (il s'agit donc du cas le plus optimiste possible).

Le tableau 120 contient le score de recyclabilité obtenu par chaque matériau ainsi que le score pour l'ensemble des matériaux du Fairphone 2®.

Recyclabilité	τ_r	τ_p	r_m	R_m
Acier inoxydable	0,99	1,00	0,99	
Fe (fer)	0,70	1,00	0,70	
Ag (argent)	0,80	1,00	0,80	
Al (aluminium)	0,10	1,00	0,10	
Au (or)	0,90	1,00	0,90	
Co (cobalt)	0,80	1,00	0,80	
Cu (cuivre)	0,90	1,00	0,90	
Cr (chrome)	0,00	1,00	0,00	
Mg (magnésium)	0,90	1,00	0,90	
Mn (manganèse)	0,00	1,00	0,00	
Ni (nickel)	0,80	1,00	0,80	
Pb (plomb)	0,00	1,00	0,00	
Pd (palladium)	0,00	1,00	0,00	
Pt (platine)	0,90	1,00	0,90	
Si (silicium)	0,00	1,00	0,00	
Sn (étain)	0,60	1,00	0,60	
W (tungstène)	0,00	1,00	0,00	
Zn (zinc)	0,00	1,00	0,00	
Gd (gadolinium)	0,00	1,00	0,00	
Nd (neodymium)	0,00	1,00	0,00	
Pr (praseodymium)	0,00	1,00	0,00	0,29
P (phosphore)	0,00	1,00	0,00	
PC (polycarbonate)	0,95	1,00	0,95	
PE (polyéthylène)	0,00	1,00	0,00	
PVC (polychlorure de vinyle)	0,00	1,00	0,00	
TPU (polyuréthane thermoplastique)	0,00	1,00	0,00	
PC Mix (polycarbonate + fibre de verre)	0,00	1,00	0,00	
PA Mix (polyamide + fibre de verre)	0,00	1,00	0,00	
Autres plastiques (COC, PSU et PBT*)	0,00	1,00	0,00	
Plastique non défini (ABS*)	0,95	1,00	0,95	
Caoutchouc	0,00	1,00	0,00	
Epoxy	0,00	1,00	0,00	
Polyimide (PI)	0,00	1,00	0,00	
Polymère à cristaux liquides (LCP)	0,00	1,00	0,00	
Verre	0,00	1,00	0,00	
Graphite	0,00	1,00	0,00	
Couche ITO	0,64	1,00	0,64	
Cristal liquide	0,00	1,00	0,00	
LCO	0,81	1,00	0,81	
LiPF6	0,00	1,00	0,00	
Autres	0,00	1,00	0,00	

Tableau 120. Recyclabilité des matériaux

La valeur de l'indicateur est relativement faible, ce qui indique que les matériaux du produit sont globalement mal recyclés.

5.2.3.4. Synthèse des résultats et conclusions sur la recyclabilité du Fairphone 2® et de ses composants

La synthèse des résultats précédents est présentée à la figure 86. Le score de recyclabilité du produit est ainsi défini comme la moyenne des deux scores de performance associés aux leviers d'actions calculés ci-dessus.

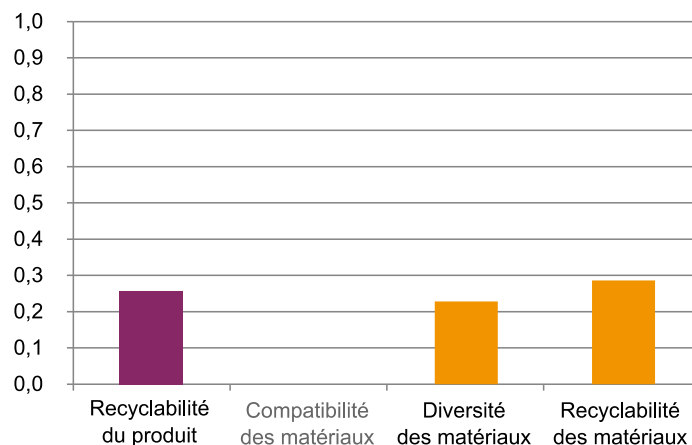


Figure 86. Recyclabilité du Fairphone 2®

Le score de recyclabilité du Fairphone 2® est assez faible.

5.2.4. Toxicité des matériaux

La toxicité d'un matériau a été définie selon qu'il est considéré comme toxique ou pas, et s'il respecte le cas échéant la concentration maximale tolérée.

Dans le cas des EEE, la limitation de l'utilisation de substances dangereuses est définie par la directive 2011/65/UE (Parlement Européen et Conseil de l'Union Européenne 2011). Les substances soumises à limitations et les valeurs de concentration maximales tolérées (en masse dans les matériaux homogènes) sont présentés dans le tableau 121.

Concentration maximale tolérée (%)	
Plomb	0,10
Mercurure	0,10
Cadmium	0,01
Chrome hexavalent	0,10
Polybromobiphényles	0,10
Polybromodiphényléthers	0,10

Tableau 121. Liste de substances soumises à limitations pour les EEE
et leurs des concentrations maximales tolérées

À partir de ces informations, nous avons pu calculer le score de toxicité pour chaque matériau ainsi que le score pour l'ensemble des matériaux du Fairphone 2® (voir tableau 122).

Toxicité	Listé	t_o_m	To_m
Acier inoxydable	non	1,00	
Fe (fer)	non	1,00	
Ag (argent)	non	1,00	
Al (aluminium)	non	1,00	
Au (or)	non	1,00	
Co (cobalt)	non	1,00	
Cu (cuivre)	non	1,00	
Cr (chrome)	non	1,00	
Mg (magnésium)	non	1,00	
Mn (manganèse)	non	1,00	
Ni (nickel)	non	1,00	
Pb (plomb)	oui	0,50	
Pd (palladium)	non	1,00	
Pt (platine)	non	1,00	
Si (silicium)	non	1,00	
Sn (étain)	non	1,00	
W (tungstène)	non	1,00	
Zn (zinc)	non	1,00	
Gd (gadolinium)	non	1,00	
Nd (neodymium)	non	1,00	
Pr (praseodymium)	non	1,00	0,50
P (phosphore)	non	1,00	
PC (polycarbonate)	non	1,00	
PE (polyéthylène)	non	1,00	
PVC (polychlorure de vinyle)	non	1,00	
TPU (polyuréthane thermoplastique)	non	1,00	
PC Mix (polycarbonate + fibre de verre)	non	1,00	
PA Mix (polyamide + fibre de verre)	non	1,00	
Autres plastiques (COC, PSU et PBT*)	non	1,00	
Plastique non défini (ABS*)	non	1,00	
Caoutchouc	non	1,00	
Epoxy	non	1,00	
Polyimide (PI)	non	1,00	
Polymère à cristaux liquides (LCP)	non	1,00	
Verre	non	1,00	
Graphite	non	1,00	
Couche ITO	non	1,00	
Cristal liquide	non	1,00	
LCO	non	1,00	
LiPF6	non	1,00	
Autres	non	1,00	

Tableau 122. Toxicité des matériaux

Avant d'analyser le résultat, rappelons-nous que cet indicateur se lit différemment des autres :

- une valeur de 1 signifie qu'aucun matériau ou substance toxique n'est utilisé dans le produit ;
- une valeur supérieure à zéro et inférieure ou égale à 0,5 indique qu'une ou plusieurs substances toxiques sont utilisées mais qu'elles respectent les limitations de concentration maximales ;
- une valeur nulle indique enfin l'existence d'au moins un matériau ou une substance toxique dont la concentration excède la limite maximale.

La valeur fournie par l'indicateur de toxicité des matériaux (0,5) se trouve juste au milieu de la fourchette des valeurs ce qui indique l'utilisation d'un matériau ou d'une substance dangereuse, mais dont la concentration est en dessous de la limite maximale tolérée.

5.2.5. Utilisation des matières recyclées

L'utilisation des matières recyclées a été définie comme le rapport massique de la matière recyclée utilisée et

le produit complet (voir Chapitre 4, § 2.3.2.2.12). Dans ce cadre, Fairphone® précise qu'un certain nombre de matériaux recyclés est utilisé dans le Fairphone 2® :

- environ 50 % du tungstène utilisé dans le moteur vibrant provient de sources recyclées ;
- 50 % du polycarbonate utilisé pour la coque arrière et les modules provient de sources recyclées post-consommation ;
- 34 % du cuivre utilisé dans les circuits imprimés provient de sources recyclées ;

(Fairphone 2018b).

À partir de ces informations nous avons pu calculer le taux de contenu recyclé du Fairphone 2® (voir tableau 123).

Contenu recyclé	m_{mr}	m_{cr}	m_p	τ_{cr}
Cu (cuivre)	1,38			
W (tungstène)	0,24	25,67	170,1	0,15
PC (polycarbonate)	24,06			

Tableau 123. Taux de contenu recyclé

L'indicateur indique que le Fairphone 2® contient un minimum de 15 % de matériaux recyclés. Ce chiffre a été calculé à partir des seules informations certaines sur l'apport en matière recyclée (Fairphone 2018b). Cependant, d'autres matériaux (notamment les métaux) pourraient aussi représenter un apport important.

5.3. Analyse des résultats

La validation de l'outillage des lignes directrices d'écoconception comme outil d'aide à la décision en conception a été mené en deux parties.

5.3.1. Performance du Fairphone 2® vis-à-vis de sa valorisation fonctionnelle

Les résultats concernant la performance du Fairphone 2® vis-à-vis d'une valorisation fonctionnelle sont présentés dans la figure 87.

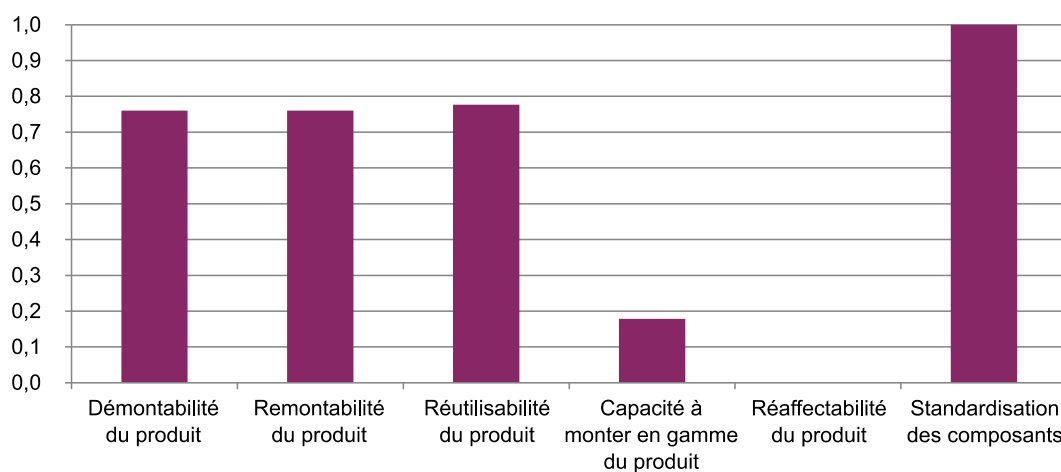


Figure 87. Performance du Fairphone 2® vis-à-vis d'une valorisation fonctionnelle

Tel que précisé précédemment, le Fairphone 2® doit en principe obtenir un bon score de performance vis-à-vis de sa valorisation fonctionnelle puisqu'il été conçu de façon à être démonté et remonté facilement pour le rendre facilement réparable et capable de monter en gamme pour prolonger ainsi sa durée de vie.

Il peut être noté sur la figure 87 que le Fairphone 2® est très performant pour la majorité des indicateurs évalués. Les constats suivants ont été faits :

- les scores de performance pour la démontabilité et la remontabilité sont très élevés ce qui correspond aux attentes évoquées précédemment. De plus, les deux score sont égaux ce qui implique qu'il est aussi facile à démonter qu'à remonter ;
- un très haut score de réutilisabilité du produit implique que la plupart du téléphone (en termes de masse) est réutilisable. En effet il a été observé lors d'une remise en état que seule la batterie n'est pas réutilisable car elle est systématiquement changée par une neuve ;
- le faible score de capacité à monter en gamme du produit est expliqué par le fait que les seuls composants susceptibles d'être améliorés sont les modules supérieur et caméra. Pour améliorer ce score, d'autres modules pourraient aussi être proposés pour cette opération (p. ex. un module central avec plus de mémoire interne ou un processeur plus puissant) ;
- le score nul associé à la réaffectabilité du produit signifie tout simplement qu'à ce jour, il n'y a pas d'autre utilisation pour le téléphone que celle pour laquelle il a été conçu. Néanmoins, proposer des solutions de réaffectabilité dès la conception pourrait être très intéressant pour sa valorisation fonctionnelle car les smartphones sont des machines puissantes dont le champ d'utilisations possibles est vaste ;
- enfin, le score élevé de la standardisation des composants implique que le téléphone est conçu pour utiliser des périphériques standards.

L'ensemble de ces résultats est cohérent avec ce qui était attendu. Lorsqu'un concepteur est confronté à de tels résultats, il peut facilement identifier que les deux leviers d'action les plus intéressants en conception sont la réaffectabilité et la capacité du produit à monter en gamme car ils présentent une performance très faible.

5.3.2. Performance du Fairphone 2® vis-à-vis de sa valorisabilité matière

Dans la deuxième partie de notre étude, la performance du Fairphone 2® a été évaluée vis-à-vis de sa valorisabilité matière. Les résultats de cette étude sont présentés dans la figure 88.

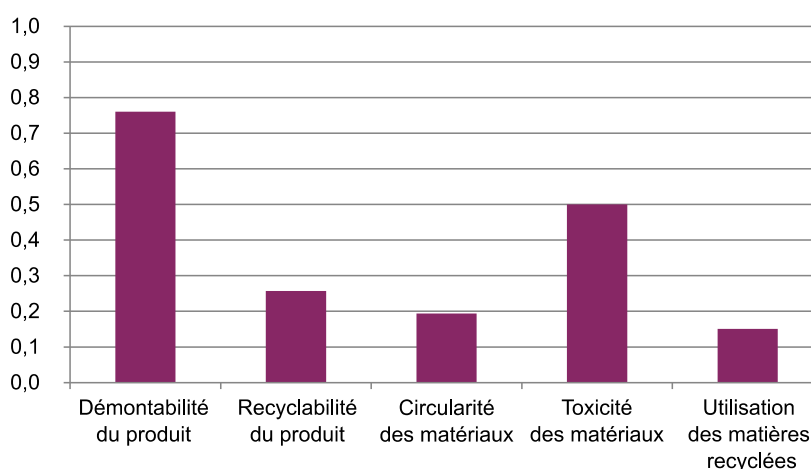


Figure 88. Performance du Fairphone 2® vis-à-vis d'une valorisation matière

Contrairement au cas précédent, nous attendons ici un score plus faible. En effet, le Fairphone 2® n'a pas été conçu pour faciliter son recyclage, même si la filière de recyclage pourrait bénéficier de sa modularité et de sa démontabilité.

Il peut être noté sur la figure 88 que le Fairphone 2® est peu performant pour la majorité des indicateurs évalués. Les constats suivants ont été faits :

- le score de démontabilité du produit est aussi performant que pour la valorisation fonctionnelle (ce qui est cohérent puisqu'ils sont calculés de la même manière) ;
- le faible score sur la recyclabilité du produit est cohérent avec le produit analysé car il n'a pas été conçu pour être recyclé. La faible valeur s'explique par le fait que le produit a une grande diversité de matériaux d'une part, et ces matériaux ont une faible recyclabilité d'autre part ;
- le faible score de circularité des matériaux s'explique (à quelques exceptions près comme l'argent et le plomb) par le fait que les matières recyclées représentent encore une faible part dans la production des matières premières. En effet, même si le recyclage en fin de vie est remarquablement élevé pour plusieurs matériaux, il n'est généralement pas suffisant pour répondre aux exigences actuelles d'approvisionnement de l'UE (European Commission et Directorate-General for Internal Market 2018) ;
- le score de toxicité des matériaux de 0,5 indique que le produit utilise un seul matériau ou une substance considéré comme toxique. En revanche, cette valeur (non nulle) indique aussi que la limite de concentration maximale tolérée établie par la législation est bien respectée ;
- le score concernant enfin l'utilisation des matières recyclées est le plus faible de l'ensemble, mais comme évoqué précédemment, d'autres matériaux (notamment les métaux) pourraient avoir des apports en matière recyclée non négligeables (voir tableau 118).

Lorsqu'un concepteur est confronté à ces résultats, il peut identifier que les trois leviers d'action les plus intéressants à actionner en conception sont l'utilisation des matières recyclées, la circularité des matériaux et la recyclabilité du produit car les trois ont des performances faibles.

5.3.3. Bilan

En conclusion, le Fairphone 2® est globalement performant vis-à-vis de la valorisation fonctionnelle, mais peu au regard de sa valorisation matière ce qui correspond à ce qui était envisagé. Nous pouvons ainsi valider l'outillage des lignes directrices en tant qu'outil d'aide à la conception.

Il faut toutefois noter que dans les deux études, les leviers dont la performance est la plus faible (c.-à-d. la réaffectabilité du produit pour la valorisation fonctionnelle et l'utilisation des matières recyclées pour la valorisation matière) ne sont pas ceux qui pourraient avoir le plus d'impact global, mais ceux qui auraient la marge d'amélioration la plus large.

Une deuxième étude sur un autre smartphone qui n'aurait pas été spécifiquement conçu pour être modulaire, ni aussi facilement démontable, est nécessaire pour pouvoir valider pleinement la proposition. Nous nous attendons à ce que les indicateurs fournissent, pour une telle étude, un score beaucoup moins performant pour la valorisation fonctionnelle et un score sans doute similaire pour la valorisation matière.

6. Validation de la proposition de méthode d'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée comme outil d'aide à la décision en conception

Fairphone® déclare sur son site qu'il utilise du polycarbonate, du cuivre et du tungstène recyclés dans ses produits. Pour valider notre proposition de méthode, nous avons décidé d'évaluer la viabilité d'utilisation de l'un de ces matériaux dans le cadre d'une économie circulaire. En d'autres termes, nous cherchons à évaluer la viabilité d'utilisation d'un matériau recyclé issu de la filière des DEEE.

Le polycarbonate recyclé issu de la filière des DEEE française a été choisi comme cas d'étude.

6.1. Évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée

6.1.1. Évaluation de la pertinence technique de l'utilisation

La pertinence technique de l'utilisation de la matière recyclée a été définie à partir du taux de pureté et de la sûreté d'approvisionnement (voir Chapitre 4, § 3.2.1.1). Pour effectuer ce calcul, nous prenons en compte les deux points suivants :

- la Chaire Mines Urbaines précise que l'impureté des plastiques recyclés de la filière DEEE est d'entre 12 % et 15 %. Par manque d'informations sur le PC, nous avons utilisé la valeur la plus élevée de cette plage pour notre étude ;
- d'autre part, l'hypothèse suivante est retenue : l'acteur responsable de fournir la matière recyclée a été contrôlé et validé par le service achat. Ainsi, la valeur de 1 a été attribuée pour l'indicateur de sûreté d'approvisionnement.

La pertinence technique de l'utilisation du PC recyclé est ainsi présentée dans le tableau 124.

	τ_p	S_{am}	P_{teu}
PC (polycarbonate)	0,85	1,00	1,15

Tableau 124. Pertinence technique de l'utilisation du PC recyclé

L'indicateur de pertinence technique fournit un score de 1,15 qui est au-dessus de la valeur de référence (égale à 1). Ceci implique que l'utilisation de PC recyclé est techniquement moins recommandée que celle de matériaux vierges à cause de ses impuretés.

6.1.2. Évaluation de la pertinence économique de l'utilisation

La pertinence économique de l'utilisation du PC recyclé a été définie comme le rapport de prix de la matière recyclée (v_{ec}) et de la matière vierge ($v_{ec,ref}$) (voir Chapitre 4, § 3.2.1.2).

La pertinence économique de l'utilisation du PC recyclé est ainsi présentée dans le tableau 125.

	v_{ec} (€·g ⁻¹)	$v_{ec,ref}$ (€·g ⁻¹)	P_{ecu}
PC (polycarbonate)	2,86E-03	3,49E-03	0,82

Tableau 125. Pertinence économique de l'utilisation du PC recyclé

L'indicateur de pertinence économique fournit un score de 0,82 qui est en dessous de la valeur de référence (égale à 1). Ceci implique que l'utilisation de PC recyclé est économiquement plus souhaitable que l'utilisation de matériaux vierges.

6.1.3. Évaluation de la pertinence environnementale de l'utilisation

La pertinence environnementale de l'utilisation de la matière recyclée a été définie dans le chapitre précédent à partir du rapport entre les impacts environnementaux du traitement en fin de vie (v_{en}) par ceux de la production des matières premières ($v_{en,ref}$) (voir Chapitre 4, § 3.2.1.3).

Les impacts ont été calculés en utilisant la méthode CML en ayant pour unité fonctionnelle de produire un kilogramme de PC (vierge ou recyclé). Notons que :

- l'impact environnemental de la production des matières premières primaires (c.-à-d. vierges) a été calculé en utilisant la base de données Ecoinvent 3 ;
- l'impact environnemental de la production des matières premières secondaires (c.-à-d. recyclées) a été calculé en utilisant la base de données créée par Eco-systèmes et Récylum. Elle permet en effet aux fabricants d'évaluer les impacts ou les bénéfices environnementaux du recyclage de plus de 60 matériaux issus des équipements électriques et électroniques en fin de vie (BLEU SAFRAN, HUGREL, et PALLUAU 2017) ;
- les catégories d'impacts retenues sont les mêmes que celles utilisées dans le rapport de Fraunhofer sur l'ACV du Fairphone 2® (Fraunhofer IZM 2016).

La pertinence environnementale de l'utilisation du PC recyclé ainsi que celles associées à chaque catégorie d'impact sont détaillées dans le tableau 126.

Catégorie d'impact	Indicateur	Unité	v_{en}	$v_{en,ref}$	P_{enu}^k	P_{enu}
Changement climatique	GWP	kg CO ₂ eq	1,61E+00	8,20E+00	0,20	
Épuisement des ressources	ADP (éléments)	kg Sb eq	7,56E-06	1,59E-06	4,75	1,29
	ADP (fossils)	MJ	1,34E+01	9,25E+01	0,14	
Toxicité humaine	Humantox	kg DCB eq	5,46E-01	4,16E-01	1,31	
Ecotoxicité	Ecotox	kg DCB eq	6,70E-03	2,18E-01	0,03	

Tableau 126. Pertinence environnementale de l'utilisation du PC recyclé

Nous pouvons observer que sur le plan environnemental, le recyclage du PC est très avantageux pour les catégories de changement climatique, d'écotoxicité et d'épuisement de combustibles fossiles. En revanche en termes de toxicité humaine et surtout d'épuisement des ressources, c'est la production de matières vierges qui est la moins impactante et donc la plus avantageuse.

L'indice de pertinence environnementale, construit à partir de l'agrégation des indicateurs de pertinence pour chaque catégorie d'impact, fournit un score de 1,29 qui est au-dessus de la valeur de référence (1). Ceci implique que l'utilisation de PC recyclé est environnementalement moins recommandée que l'utilisation de matériaux vierges.

6.1.4. Évaluation de l'indice de viabilité d'utilisation de la matière recyclée (agrégation des trois dimensions)

L'indice d'utilisation de la matière recyclée est construit à partir de l'agrégation de la pertinence d'utilisation dans les dimensions technique, économique et environnementale (voir Chapitre 4, § 3.2.3).

Le score de viabilité d'utilisation du PC recyclé et sa pertinence dans les trois dimensions sont présentés dans le tableau 127 et illustrés à la figure 89.

	Pertinence technique	Pertinence économique	Pertinence environnementale	Viabilité d'utilisation
PC (polycarbonate)	1,15	0,82	1,29	1,09

Tableau 127. Viabilité d'utilisation de la matière recyclée

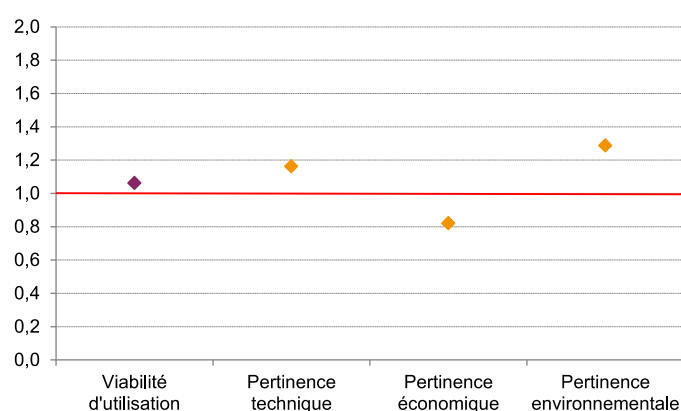


Figure 89. Viabilité d'utilisation de la matière recyclée

L'indice viabilité d'utilisation de la matière recyclée fournit un score de 1,09 qui est au-dessus de la ligne rouge indiquant la valeur de référence (1). Ceci implique que l'utilisation de PC recyclé issu de la filière des DEEE est moins recommandée que l'utilisation de matériaux vierges, car elle n'est avantageuse que sur le plan économique.

6.2. Analyse des résultats

Le cas d'étude a permis de valider cette proposition de méthode d'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée. En effet, l'analyse d'un graphique comme celui qui est présenté à la figure 89 permet au concepteur de valider rapidement la viabilité d'utilisation car tout ce qui est en dessous de la ligne rouge (valeur de référence) est considéré comme non pertinent.

Avant de réaliser cette étude, on s'attendait à une valeur en dessous de la référence pour l'indicateur de pertinence technique à cause des impuretés du traitement. Pour les dimensions économique et environnementale, nous nous attendions à ce que l'utilisation de la matière recyclée soit plus intéressante que l'utilisation de la matière vierge. Ceci s'est avéré faux pour la dimension environnementale. Ce constat met en évidence toute l'importance de l'analyse conjointe des dimensions technique, économique et environnementale.

Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives

1. Apports scientifiques et limites de la proposition

Un état des lieux des politiques de gestion des déchets et d'économie circulaire actuellement mises en œuvre a permis de souligner l'absence de synergie entre les acteurs de la conception d'un produit et ceux de la filière en charge de son traitement en fin de vie. Leurs champs d'action sont en effet clairement découplés temporellement, mais aussi souvent géographiquement. L'interaction entre concepteurs et acteurs de la filière est ainsi très faible. Ce constat nous a conduit à exprimer la problématique suivante : « *Comment créer un lien direct et bijectif entre le concepteur d'un produit et les acteurs de la filière en charge de son traitement en fin de vie ? Comment pérenniser cet échange d'informations entre acteurs ?* »

Pour y répondre, deux outils d'évaluation et d'aide à la décision en conception ont été proposés. Le premier s'inscrit dans le cadre d'une démarche de conception *pour* la fin de vie, le deuxième propose une démarche *depuis* la fin de vie. L'association de ces outils assure le développement d'un lien entre concepteurs et acteurs de la filière.

1.1. Conception pour la fin de vie

Dans le cadre des démarches de conception pour la fin de vie, un outil d'aide à la décision en conception piloté par l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit et l'outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie a été proposé. La démarche se déroule ainsi en trois temps :

- **Étape 1.** Évaluation de la valorisabilité du produit ;
- **Étape 2.** Aide à la décision en conception ;
- **Étape 3.** Reconception du produit.

Les étapes 1 et 2 répondent à des problématiques spécifiques dont les apports et les résultats obtenus seront commentés ci-après (voir § 1.1.1 et § 1.1.2).

1.1.1. Évaluation de la valorisabilité du produit

Un état des lieux des méthodes utilisées en conception pour évaluer la performance d'intégration d'un produit par sa filière de traitement en fin de vie a permis de montrer que les méthodes de référence ne permettent pas d'évaluation sur les trois dimensions technique, économique et environnementale. En effet à ce jour, deux paramètres seulement sont pris en compte : la valorisabilité (critère technique) d'une part, et les impacts environnementaux (critère environnemental) d'autre part. Ce constat a permis de d'identifier la problématique suivante : « *Quels éléments prendre en compte en conception pour évaluer d'une part la valorisabilité du produit, et d'autre part la pertinence de la valorisation envisagée sur les plans économique et environnemental ?* »

Pour y répondre, des indicateurs permettant d'évaluer la performance technique du traitement ainsi que ses pertinences économique et environnementale ont été proposés. L'utilisation d'indices permet de simplifier la prise de décision en synthétisant des éléments complexes ou multidimensionnels en une seule valeur. C'est pourquoi, un indice d'évaluation de la valorisabilité du produit construit à partir de l'agrégation d'indicateurs de performance a aussi été proposé.

La proposition de méthode d'évaluation de la valorisabilité du produit a été validée à partir d'une étude portant sur le traitement en fin de vie du Fairphone 2®. Trois scénarios ont été analysés :

- dépollution et récupération de matière par fusion ;
- démontage et récupération sélective de matière par fusion ;
- broyage, prétraitement physique et métallurgie.

La modélisation des scénarios a été réalisée uniquement sur les dimensions technique et économique en raison du manque de données environnementales. Les constats suivants ont été établis :

- *Dimension technique de la valorisabilité.* Nous n'avons pas retrouvé les mêmes valeurs de valorisation matière que ceux présentés dans l'étude de recyclabilité réalisée par Fairphone® (Fairphone 2017). En revanche, le classement des scénarios suit la même tendance. En effet, le troisième est toujours celui qui offre la valorisation matière la plus importante (soit 41 %), suivi par le deuxième (22 %) et enfin le premier (10 %) ;
- *Dimension économique de la valorisabilité.* Contrairement à ce qui aurait pu être attendu, la pertinence économique des trois scénarios est très proche (toutes de l'ordre de 20 %) ;
- *Agrégation des dimensions.* Le troisième scénario reste le meilleur car il offre le meilleur équilibre entre les dimensions technique et économique. Il est toutefois important de préciser que la pureté des matériaux en fin de recyclage n'a pas pu être prise en compte à cause d'un manque de données ; ceci pourrait avoir un impact significatif sur la pertinence économique du scénario où des impuretés dans les matériaux sont attendues.

L'étude de cas a mis en évidence l'intérêt d'évaluer la valorisabilité du produit à partir d'une approche multidimensionnelle. En effet, l'analyse technico-économique a montré qu'une évaluation uniquement massique de la valorisabilité n'est pas suffisante pour définir la pertinence d'un traitement par rapport à un autre.

Elle n'a en revanche pas permis de valider l'indice d'agrégation qui cherche à favoriser la réduction des valeurs les plus élevés (c.-à-d. ceux qui sont les moins performants). Cependant, un exemple permettant de mettre en évidence l'intérêt d'utiliser cette méthode d'agrégation a été proposé.

L'un des constats les plus marquants de cette étude a été d'observer comment la valeur est perdue drastiquement lorsqu'on descend dans la hiérarchie des déchets. Par exemple, le Fairphone 2 Édition Nouvelle

Vie® est vendu à 299 € ; 75 % de sa valeur initiale est ainsi récupérée lorsqu'on valorise fonctionnellement. En revanche, une grande part de la valeur sera perdue dans le cadre d'une valorisation matière. Nous avons en effet constaté que la valeur matière de notre produit de référence est 1,5 % de sa valeur initiale. De plus, quel que soit le scénario de valorisation, seul 20 % (de 1,5 %) peut être récupéré, c'est-à-dire 0,3 % de la valeur initiale du produit (soit 1,2 €). Ce constat indique que les efforts d'écoconception pour la fin de vie doivent être centrés pour *favoriser la valorisation fonctionnelle*.

L'une des limites de la méthode est bien évidemment la difficulté d'accès aux informations comme

- les données techniques de conception. Le concepteur aura assurément une nomenclature précise de son produit. Cependant, une composition matière détaillée de chaque composant sera plus difficile à obtenir car il est pratique courante dans l'industrie d'acheter des modules ou des composants à intégrer directement au produit ;
- les données techniques de la filière. Ces données issues de la filière de recyclage correspondent au traitement d'un flux de déchets et non d'un produit ou d'un type de produit en particulier. Elles peuvent être utilisées pour analyser la performance technique du traitement, mais le résultat sera une mauvaise estimation de ce qui se passe réellement pour le produit ;
- ou les caractéristiques environnementales de la filière. Il est enfin délicat en conception de calculer précisément l'impact environnemental du traitement par matériau. On peut noter que l'éco-organisme ESR a fait le premier pas pour certains matériaux (BLEU SAFRAN, HUGREL, et PALLUAU 2017).

Une autre limite de la méthode est qu'elle considère la perte de pureté des matériaux en fonction de la quantité des impuretés (en masse) contenues dans le matériau. Elle ne permet pas de préciser si ce facteur conditionne le marché pour la revente de matière (ni même si elle serait purement et simplement invendable).

Pour conclure, il faut noter que notre proposition de méthode d'évaluation de la valorisation a été créée dans l'optique d'être utilisée pour comparer plus facilement des produits ou des composants et simplifier ainsi la prise de décision en conception (voir paragraphe suivant). Nous montrons ainsi que la proposition répond à problématique de recherche identifiée.

1.1.2. Aide à la décision en conception

Lors d'une démarche d'écoconception, le concepteur est confronté à la difficulté de l'analyse multicritère : il doit interpréter les informations fournies par un ensemble d'indicateurs et trouver le meilleur compromis entre les exigences techniques, environnementales et économiques. Dans ce cadre, un état des lieux des outils de conception a permis de constater qu'il n'existe pas à ce jour d'outils d'aide à la décision en conception permettant de trouver le meilleur équilibre entre ces différentes dimensions d'analyse. Ce constat a permis de formuler la problématique suivante : « *Comment communiquer efficacement au concepteur les résultats de cette évaluation pour faciliter et améliorer sa prise de décision ?* ».

Pour répondre à la problématique, un outillage de lignes directrices de conception a été réalisé. En effet, un inventaire des démarches d'écoconception pour la fin de vie a permis de montrer que les résultats de l'évaluation de la valorisabilité doivent être présentés sous la forme de lignes directrices de conception (telles que celles utilisées dans toute démarche de conception pour X). L'outillage permet ainsi de créer le lien entre les méthodes d'évaluation et d'aide à la décision en conception.

Les indicateurs permettant d'évaluer la performance du produit ont été définis pour les 33 leviers d'action identifiés. Il faut noter que les indicateurs ont été choisis ou construits avec pour objectif leur simplicité

d'utilisation et d'interprétation ; le concepteur doit en effet être capable de les utiliser rapidement et facilement.

Pour valider l'outil, nous avons à nouveau considéré le Fairphone 2®, sachant qu'il a été conçu pour être facilement réparable et capable de monter en gamme. Ainsi, nous nous attendons à trouver un score élevé pour la valorisation fonctionnelle et un plus faible pour la valorisation matière. Les résultats suivants ont été obtenus :

- *Performance vis-à-vis de la valorisation fonctionnelle.* Le Fairphone 2® est très performant pour la majorité des indicateurs évalués (démontabilité, remontabilité, réutilisabilité du produit et standardisation des composants). Seuls la capacité à monter en gamme et la réaffectabilité ont été identifiés comme peu performants ;
- *Performance vis-à-vis de la valorisation matière.* Le Fairphone 2® est peu performant pour la majorité des indicateurs évalués (recyclabilité du produit, circularité et toxicité des matériaux, et utilisation de matières recyclées). Seule la démontabilité du produit a été identifiée comme performante.

Parmi les limites de la proposition, il est important de préciser que la recherche bibliographique permettant de définir un indicateur de performance pour les 33 leviers d'action et les trois principales contraintes réglementaires n'a pas pu être réalisée de façon exhaustive. Cela implique qu'il peut y avoir d'autres indicateurs très pertinents non identifiés. Cependant pour choisir tout nouvel indicateur, il faudra veiller à sa facilité d'utilisation pour qu'il puisse être effectivement utilisé en conception.

La difficulté d'accès aux données a également été identifiée comme un point limitant l'usage de ces outils.

Pour conclure, nous avons montré sur le cas d'étude un ensemble de résultats cohérents avec les axes de conception d'un produit type, conçu spécialement pour proposer un produit modulaire facilement démontable et remontable. Ceci nous a permis de valider nos indicateurs outillant les lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie.

1.2. Conception depuis la fin de vie

Il a par ailleurs été rappelé que la promotion de l'utilisation de la matière recyclée en conception de produit est une démarche fondamentale pour favoriser l'économie circulaire. Un deuxième outil permettant d'évaluer la viabilité d'utilisation de la matière recyclée a ainsi été proposé. Il s'inscrit dans une démarche de conception *depuis* la fin de vie.

De même que pour la conception *pour* la fin de vie, l'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée s'intéresse aux dimensions technique, économique et environnementale.

Fairphone® déclare qu'il utilise du polycarbonate, du cuivre et du tungstène recyclés dans ses produits. Nous avons décidé d'évaluer la viabilité d'utilisation de l'un de ces constituants avec notre outil pour le valider. Le polycarbonate recyclé a été choisi comme cas d'étude. Les constats suivants ont été effectués :

- la pertinence technique de l'utilisation de PC recyclé n'a pas été validée car elle est 15 % au-dessus de la valeur de référence (100 % de pureté) ;
- la pertinence économique de l'utilisation de PC recyclé a été validée car elle est 18 % en dessous de la valeur de référence (le prix de la matière recyclée) ;
- la pertinence environnementale de l'utilisation de PC recyclé n'a pas été validée car elle est 29 % au-dessus de la référence (les impacts environnementaux de la production du PC vierge). Il faut toutefois

préciser que la filière française des DEEE a été choisie comme modèle pour calculer les impacts environnementaux du traitement de plastique en fin de vie et que le PC recyclé issu d'une autre filière pourrait avoir un meilleur score de pertinence environnementale ;

- la viabilité d'utilisation du PC recyclé n'a pas été validée car le score fourni par l'indice agrégation est 9 % au-dessus de la valeur de référence. Le PC recyclé est donc globalement moins pertinent que le PC vierge.

La proposition de méthode d'évaluation de la viabilité d'utilisation de la matière recyclée a été créée pour que le concepteur puisse évaluer facilement et objectivement la pertinence d'utiliser une matière recyclée sur les plans technique, économique et environnemental. Dans ce cadre, nous prouvons que la proposition répond à son objectif.

2. Perspectives

2.1. Outil de conception pour la fin de vie

Plusieurs perspectives sont envisagées dans le cadre de cette proposition d'outil d'aide à la décision en conception pilotée par l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit et l'outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie.

La première est liée au fait que les indicateurs outillant les lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie ont été seulement confrontées à un produit, le Fairphone 2[®]. La prochaine étape est donc d'évaluer les mêmes indicateurs sur un autre smartphone qui n'aurait pas été conçu pour être modulaire, ni aussi facilement démontable. Nous attendons ici que les indicateurs fournissent un score beaucoup moins performant pour la valorisation fonctionnelle et un score sans doute similaire pour la valorisation matière. Un autre essai à mener est de confronter les outils à d'autres typologies de produits. Les écrans plats qui ont été largement abordés dans la littérature pourraient être une bonne option (Ardente et al. 2013; Vanegas et al. 2018; Horta Arduin et al. 2019).

La deuxième perspective s'exprime à partir du fait que les quatre indicateurs dont l'utilisation est réservée uniquement aux démarches de conception pour la valorisation énergétique ou pour l'élimination (c.-à-d. les indicateurs de biodégradabilité, inflammabilité, pouvoir calorifique et rareté des matériaux) n'ont pas pu être testés. Une validation dans la même logique que les deux autres menées dans ce document reste ainsi nécessaire. Pour cela, deux produits différents pourraient être analysés : un dont la voie de traitement privilégié par la filière est la valorisation énergétique et un autre dont la voie est l'élimination. Le but serait de vérifier la performance de ces produits vis-à-vis de ces voies de traitement.

La troisième perspective est liée à l'indicateur de modularité. Il mérite sans doute d'être reconstruit en détail car cette caractéristique est fonction d'autres facteurs (tel que l'interaction entre composants) qui ne sont pas pris en compte dans l'indicateur actuel.

Enfin, nous estimons que le développement d'un environnement numérique couplé au(x) logiciel(s) de conception permettrait de capitaliser l'ensemble des connaissances développées dans ce travail. L'objectif est de permettre au concepteur de mieux appréhender les outils proposés tout au long de son processus de conception. Un tel outil informatique assurerait en outre de mettre à disposition et d'actualiser les bases de données techniques, économiques et environnementales accumulées pour alimenter les données de l'étude en cours et des suivantes.

2.2. Outil de conception depuis la fin de vie

La première perspective serait de mener d'abord d'autres tests sur le même matériau (PC recyclé), puis sur d'autres dans un deuxième temps. Il faut toutefois noter que cet outil ne pourra pas être totalement validé qu'en le confrontant à une situation réelle au sein d'une entreprise. En effet, nous avons testé l'outil uniquement sur un constituant pour montrer surtout l'intérêt de ce type d'outil.

De même que pour l'outil de conception pour la fin de vie, le développement d'un environnement numérique intégré au processus de conception est nécessaire pour capitaliser la démarche d'une part, et consolider et actualiser les bases de données d'autre part.

Annexes

Annexe 1

Glossaire

Acteur Personne (physique ou morale) ou entreprise jouant un rôle effectif dans un projet (p. ex. au sein de la filière de recyclage).

ACV (voir *Analyse de cycle de vie*)

Amélioration (voir *Montée en gamme*)

Analyse du cycle de vie (ACV) Compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie. (ISO 2006a)

Artéfact Formé sur le latin *ars, artis* (art) et le participe passé de *facere* (faire), puis emprunté à l'anglais *artéfact*, le terme *artéfact* désigne, dans l'une de ses nombreuses acceptions, « ce qui est réalisé par l'homme, un produit artificiel ». C'est donc « un produit [...] de l'industrie », autrement dit un produit *manufacturé*. L'*artéfact* désigne enfin tout produit ayant subi une transformation *même minime* par l'homme (ce qui le distingue alors de tout autre généré par un phénomène naturel).

Avant-projet Première étape du développement d'un produit dont l'objectif est de délimiter les contours du projet et d'en définir le cadre.

Broyage Étape du processus de recyclage dont l'objectif est de broyer le composant à traiter jusqu'à obtenir des particules mono-matériau plus facilement séparables.

Chaîne d'approvisionnement Ensemble des processus en amont du site de production permettant la mise à disposition du produit ou du service considéré. (Jolliet, Saadé, et Crettaz 2005)

Chaîne d'approvisionnement durable Chaîne d'approvisionnement qui regroupe non seulement la logistique de la chaîne conventionnelle, mais aussi la gestion du produit en fin de vie, en intégrant les considérations économiques, environnementales et sociétales du développement durable.

Chaîne d'approvisionnement en boucle fermée Chaîne d'approvisionnement qui regroupe les logistiques de la chaîne conventionnelle et de la logistique inverse.

Chaîne d'approvisionnement verte Chaîne d'approvisionnement qui regroupe la logistique de la chaîne

conventionnelle et la gestion du produit en fin de vie, et qui intègre les aspects environnementaux.

Collecte Ensemble des opérations de ramassage des déchets, et de tris et stockage préliminaires, en vue de leur transport vers une installation de traitement des déchets. (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2008)

Combustible solide de récupération (CSR) Combustibles de substitution dérivés des déchets non dangereux utilisés pour leur haut pouvoir calorifique à des fins de valorisation énergétique en substitution des combustibles fossiles classiques. (SITA 2016)

Composant Produit, module, pièce élémentaire, etc. clairement identifié ou défini, et dont les volumes, masses, etc. sont totalement définies.

Compostage procédé de transformation aérobie (c.-à-d. en présence d'oxygène) permettant de valoriser les matières organiques en compost. (ADEME 2015f)

Concept Esquisse et/ou description du produit qui consiste en l'ébauche des technologies et principes de fonctionnement d'une part, et ses premières caractéristiques physiques (forme, dimensions approximatives, masse, etc.) d'autre part.

Conception Activité de création ou d'invention, d'amélioration ou de modification d'un produit pour répondre à des besoins, résoudre des problèmes, proposer des solutions nouvelles ou explorer des possibilités permettant d'améliorer la qualité de vie de ses utilisateurs.

Conception détaillée Étape du cycle de conception où la solution choisie est construite, détaillée et optimisée en CAO.

Conception préliminaire Étape de la conception dont l'objectif est de créer plusieurs concepts et de les comparer pour trouver la meilleure solution. Les viabilités techniques et économiques y sont aussi évaluées. Cette étape est habituellement divisée en la recherche de concept et la conception architecturale.

Constituant Matériau, substance, etc. dont les masses et volumes ne sont a priori pas précisées.

CSR (voir *Combustible solide de récupération*)

Cycle de vie Ensemble des étapes consécutives et liées d'un système de produits, de la génération des ressources naturelles à l'élimination finale du produit. (ISO 2006a)

Déchet Toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire.

Déchet (statut de -) Une fois que le détenteur du produit se défait ou qu'il a l'intention ou l'obligation de s'en défaire, le produit devient un déchet. (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2008)

Déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) Ensemble des équipements électriques et électroniques (EEE) constituant des déchets. (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2012)

Déchet stabilisé Déchet dont on a réduit la perméabilité à l'eau et la fraction lixiviable et dont on a amélioré la tenue mécanique de façon à ce qu'elle satisfasse aux critères d'acceptation des déchets stabilisés énoncés. (*Arrêté du 18 décembre 1992 relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés pour les installations existantes s. d.*)

Déchet ultime Déchet qui ne peut plus, dans les conditions techniques et économiques du moment, faire l'objet d'un traitement visant à en retirer une part valorisable ou à en réduire encore son caractère polluant ou dangereux. (Président de la République et Assemblée nationale et Sénat 1992)

Déchiquetage Étape du processus de recyclage. L'objectif est d'effectuer un premier broyage pour transformer le composant à recycler en résidus plus faciles à traiter.

DEEE (voir *Déchets d'équipements électriques et électroniques*)

Dépollution Étape du processus de recyclage. Les matières dangereuses sont extraites des déchets d'une part afin d'être traitées en toute sécurité, et d'autre part pour éviter toute contamination du reste des matériaux dans les processus ultérieurs de recyclage.

Désassemblage Étape du processus de recyclage. Chaque composant pouvant être réutilisé ou pouvant/devant être traité séparément est enlevé afin de préserver sa valeur, ou en raison d'un processus de recyclage plus complexe.

Développement durable Ensemble des pratiques répondant aux besoins actuels et qui ne compromettent pas la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins. (Brundtland et al. 1987)

Distribution (logistique et transport) Étape du cycle de vie prenant non seulement en compte la phase de distribution et de vente, mais aussi tous les aspects logistiques et de transport tout au long du cycle de vie du produit.

Écobilan (voir *Analyse de cycle de vie*)

Écoconception Intégration des aspects environnementaux dans la conception ou la reconception de produits. (Jolliet, Saadé, et Crettaz 2005)

Ecodesign (voir *Écoconception*)

Économie circulaire Modèle économique visant à décorrélérer le développement économique mondial de la consommation des ressources limitées, tout en assurant la réduction des impacts environnementaux. Ce modèle cherche d'une part à conserver la valeur des produits, des matières et des ressources aussi longtemps que possible, et à réduire d'autre part la production de déchets. (ADEME 2014a; Ellen MacArthur Foundation 2016; Commission Européenne 2015)

Éco-organisme Structure à but non lucratif à laquelle les producteurs concernés par les obligations de la REP transfèrent leurs obligations de collecte moyennant le paiement d'une contribution financière. Ils en assurent la gouvernance (Ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement 2000). Les éco-organismes sont agréés par les pouvoirs publics sur la base d'un cahier de charges précis pour mener à bien leur mission.

EEE (voir *Équipements électriques et électroniques*)

Efficacité Exprime le degré d'accomplissement des objectifs fixés. C'est le taux qui compare les résultats obtenus aux objectifs.

Efficiace Évalue les résultats à l'aune des moyens mis en œuvre. C'est le rapport entre les résultats réellement obtenus et les ressources utilisées pour les atteindre

Élimination Toute opération qui n'est pas de la valorisation même lorsque ladite opération a comme conséquence secondaire la récupération de substances, matières ou produits d'énergie. (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2008)

Équipements électriques et électroniques (EEE) Ensemble des équipements fonctionnant grâce au courant électrique ou à des champs électromagnétiques, et des équipements de production, de transfert et de mesure de ces courants et champs, conçus pour être utilisés à une tension ne dépassant pas 1000 V en courant alternatif et 1500 V en courant continu. (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne

2012)

Expression du besoin Première étape du processus de conception dont le but est de définir le contexte du projet, d'en identifier la problématique et d'en préciser l'objectif.

Extraction et fabrication de matières premières Première étape du cycle de vie. Elle consiste d'une part en l'extraction des ressources naturelles et la production des matières premières primaires, et d'autre part en la production de matières premières secondaires (c.-à-d. recyclées).

Extrant Flux physique (matières, produits, etc.), énergétique ou économique sortant d'une production.

Fabrication Étape du cycle de vie consistant à la mise en œuvre du composant.

Filières à responsabilité élargie du producteur (REP) Politique mettant en application le principe du pollueur-payeur dans la mesure où la responsabilité financière du traitement des produits en fin de vie est transférée des contribuables et des communes aux producteurs (OCDE 2017).

Filière de recyclage Système industriel distribué dont le champ d'action est limité par la législation et qui vise à réduire les impacts liés à l'extraction des matières premières, la quantité de déchets incinérés ou mis en décharge, tout en préservant la valeur de la matière. Ce système intègre d'une part l'ensemble des procédés et des acteurs (internes et externes) ayant en charge la transformation des déchets en matière recyclée, et d'autre part tous les échanges de matière, de capitaux et d'information. (Martínez Leal et al. 2016)

Filière de traitement du produit en fin de vie Système industriel distribué dont le champ d'action est limité par la législation et qui vise à préserver au maximum la valeur ajoutée d'un produit, tout en étant respectueux de l'environnement. Ce système intègre d'une part l'ensemble des procédés (de la collecte jusqu'au recyclage) et des acteurs (internes et externes) ayant en charge la récupération de la valeur ajoutée d'un produit, et d'autre part tous les échanges de matière, de capitaux et d'information.

Fin du statut de déchet Un déchet cesse d'être un déchet lorsqu'il a subi une opération de valorisation ou de recyclage et qu'il répond à des critères spécifiques définis dans le respect des conditions suivantes :

- la substance ou le constituant est couramment utilisé(e) à des fins spécifiques ;
- il existe un marché ou une demande pour une telle substance ou un tel objet ;
- la substance ou l'objet remplit les exigences techniques aux fins spécifiques et respecte la législation et les normes applicables aux produits ;
- et l'utilisation de la substance ou de l'objet n'aura pas d'effets globaux nocifs pour l'environnement ou la santé humaine. (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2008)

Fin de vie Dernière étape du cycle de vie du produit qui débute quand le produit devient un déchet.

Fin d'utilisation Étape de transition indiquant le moment où le produit sort de la phase d'utilisation et entre dans sa fin de vie.

Fluff Résidus de broyage légers.

Fonctionnalité Qualité de la fonction ; bonne adéquation ou réponse du produit à la fonction.

Gestion de la chaîne d'approvisionnement Ensemble des opérations de planification, de mise en œuvre et de contrôle permettant de rendre la chaîne d'approvisionnement le plus efficace que possible.

Gestion de la chaîne d'approvisionnement durable Gestion des flux de matériaux, d'information et de capitaux, mais aussi des coopérations entre acteurs de la chaîne, qui prend en compte les objectifs des trois axes du développement durable (c.-à-d. économique, environnementale et sociétal) comme exigences des

clients et des parties prenantes. (Seuring et Müller 2008)

Gestion de la chaîne d’approvisionnement en boucle fermé Gestion qui intègre la conception, le contrôle et le fonctionnement d’un système afin de maximiser la création de la valeur tout au long du cycle de vie du produit, en intégrant une récupération dynamique de la valeur à partir de différents types et volumes de retours dans le temps. (Guide et Van Wassenhove 2009)

Gestion de la chaîne d’approvisionnement verte Gestion qui intègre les aspects écologiques dans les pratiques inter-organisationnelles de la gestion de la chaîne d’approvisionnement traditionnelle, y compris lors de la conception du produit, dans la sélection et l’approvisionnement en matériaux, dans les procédés de fabrication, la livraison du produit final aux utilisateurs, et la gestion du produit en fin de vie. (Srivastava 2007; Sarkis, Zhu, et Lai 2011)

Gestion de la logistique inverse Optimisation des flux du consommateur (c.-à-d. de l’origine des déchets) vers les acteurs de la valorisation pour être capable de diriger de nouveau ces flux de produits reconditionnés, de pièces de rechange ou d’occasion, de matières premières de deuxième génération, etc. vers le fabricant puis de nouveau vers le consommateur.

Gestion des déchets Ensemble des opérations de collecte, transport, valorisation et élimination des déchets. Plus largement, toute activité participant à l’organisation de la prise en charge des déchets depuis leur production jusqu’à leur traitement final, y compris les activités de négoce ou de courtage et la supervision de l’ensemble de ces opérations. (« Code de l’environnement | Legifrance » s. d.)

Image de marque Ensemble des représentations, à la fois affectives et rationnelles, d’un consommateur concernant le produit. (TLFi s. d.)

Indicateur Outil d’évaluation d’un état ou d’une évolution. Cette notion sous-entend donc une relation causale entre la grandeur mesurée (autrement dit, *indiquée*) et l’indicateur. Il exprime ainsi une synthèse d’informations de natures potentiellement différentes. Il offre alors une possibilité de dialogue entre différents acteurs (spécialistes des matériaux, du recyclage, etc.).

Indice Indicateur construit par agrégation de plusieurs indicateurs.

Industrialisation Étape de la phase de conception dont l’objectif est de trouver le meilleur processus permettant d’optimiser la chaîne d’approvisionnement, tout en assurant la qualité du produit. Dans cette étape, des prototypes sont développés et testés pour valider le produit.

Intrant Flux physique (matières, produits, etc.), énergétique ou économique nécessaire au fonctionnement d’un ensemble, entrant dans une production.

Livrable Prestations attendues lors de la réalisation d’un projet.

Logistique inverse Processus de planification, de mise en œuvre et de contrôle des flux efficaces et rentables de matières, de produits et d’informations, allant du consommateur vers le fabricant, dans le but de récupérer de la valeur ou d’assurer l’élimination correcte des déchets. (Rogers et Tibben-Lembke 1998)

Maintenance corrective (ou curative) Toute opération exécutée après détection d’une panne, et destinée à remettre le produit dans l’état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. (AFNOR 2001)

Maintenance préventive Toute opération exécutée à des intervalles indéterminés ou selon des critères prescrits, et destinées à diminuer la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement du produit. (AFNOR 2001)

Matériau Matière dont la nature est spécifiée et qui entre dans la fabrication d’un artéfact (TLFi s. d.). Il est

sélectionné selon ses propriétés et mis en œuvre en vue d'un usage spécifique. On en distingue quatre grandes familles : les matériaux métalliques, minéraux, organiques et composites.

Matière Terme générique désignant toute substance destinée à être utilisée dans le cadre d'activités techniques et qui devient, après transformation, partie intégrante d'un produit fabriqué (artéfact) (TLFi s. d.). Ce terme prend un sens plus général que *matériau* car sa nature n'est alors pas spécifiée.

Matière première Matière première primaire ou secondaire (recyclée) utilisée pour réaliser un produit. (ISO 2006a)

Méthanisation Technologie basée sur la dégradation par des micro-organismes de la matière organique qui aboutit à la production d'un produit humide riche en matière organique et de biogaz. (ADEME 2017d)

Mise à jour (voir *Montée en gamme*)

Mise à niveau (voir *Montée en gamme*)

Mise en décharge (voir *Élimination*)

Mise en production (voir *Industrialisation*)

Modernisation (voir *Montée en gamme*)

Module Sous-ensemble de produit qui doit être assemblé avec d'autres pour constituer le produit complet.

Montée en gamme Toute opération de remplacement d'un matériel (module, pièce ou plus généralement composant physique) ou d'un logiciel par une version plus récente ou meilleure, afin de mettre à jour le système et/ou d'améliorer ses caractéristiques.

Négociant Tout acteur de la gestion des déchets qui entreprend pour son propre compte l'acquisition et la vente ultérieure de déchets. Cette définition intègre les négociants qui ne prennent pas physiquement possession des déchets. (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2008)

Norme ISO 22628 Norme qui spécifie la méthode de calcul des taux de recyclabilité et de valorisabilité d'un nouveau véhicule routier, exprimés comme un pourcentage de la masse (fraction massique, en pour-cent) de ce véhicule routier. (ISO 2002)

Normes ISO 14000 Série de normes développées par l'Organisation Internationale de Normalisation qui permet aux entreprises de biens ou des services de gérer l'impact de leurs activités sur l'environnement et de mesurer leurs performances environnementales. (Jolliet, Saadé, et Crettaz 2005)

Performance Grandeur qui n'est pas directement observable mais déduite d'une ou plusieurs variables (indicateurs) appartenant au champ d'investigation empirique qui exprime la capacité optimale (ou maximale) à une réalisation. C'est la relation ternaire entre les objectifs visés (cibles, estimations, projections, etc.), les moyens mis en œuvre pour les réaliser (ressources humaines, matérielles, financières ou informationnelles) et les résultats obtenus (biens, produits, services, etc.). (Gibert 1980) (Valette-Florence 1988)

Pertinence Adaptation des moyens à mettre en œuvre pour réaliser les objectifs fixés. Il s'agit donc du rapport entre les ressources et les résultats visés.

Pièce élémentaire Sous-ensemble de module (elle peut être multi-matériau ou mono-matériau).

Préparation en vue de la réutilisation Toute opération de contrôle, de nettoyage ou de réparation en vue de la valorisation, par laquelle des produits ou des composants de produits devenus des déchets sont préparés de manière à être réutilisés sans autre opération de prétraitement. (Parlement Européen & Conseil de

l'Union Européenne 2008)

Prévention Ensemble des mesures prises avant qu'une substance, une matière ou un produit ne devienne un déchet et visant à réduire :

- la quantité de déchets, y compris par l'intermédiaire du réemploi ou de la prolongation de la durée de vie des produits ;
- les effets nocifs des déchets produits sur l'environnement et la santé humaine ;
- ou la teneur en substances nocives des matières et produits. (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2008)

Procédé Méthode utilisée pour réaliser une tâche, mettre en forme un matériau ou fabriquer un produit. Le procédé doit être entendu soit comme une opération unique, soit comme l'agrégation de tâches élémentaires (sous-procédés), dont les performances doivent être évaluées par les mêmes critères, mais à une échelle différente.

Procédure Manière spécifiée de réaliser un processus.

Processus Ensemble d'activités corrélées ou interactives qui transforme des intrants en extrants. (ISO 14040)

Productivité Rapport entre les extrants (biens, produits ou services fournis) et les intrants (facteurs de production utilisés pour les obtenir, soit l'ensemble des moyens techniques, financiers et humains dont dispose une entreprise ou un organisme). (Da Silva et Santugini 2009)

Produit Tout bien ou service résultant d'une activité humaine. (ISO 2006a)

Concernant la notion de *bien*, on entendra également par *produit* tout artéfact de complexité supérieure au simple module ou a fortiori à la pièce élémentaire. Ainsi, un module est constitué de pièces et le produit de modules.

Prototypage Opération qui permet de construire un modèle physique de validation afin de tester une idée.

Qualité Ensemble des propriétés et caractéristiques d'un produit ou d'un service qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites. (Afnor 2003; Organisation internationale de normalisation 2015)

Recherche de concept Première étape de la phase de conception. Les besoins du client sont transformés en cahier de charges techniques par l'équipe de concepteurs.

Reconditionnement Procédé de restauration des composants à un état fonctionnel satisfaisant les spécifications d'origine. Ce procédé est ainsi proche assez proche de la remise à neuf mais les corrections sont plus profondes. Il consiste en la reconstruction du produit dans le respect des spécifications qui étaient les siennes en sortant d'usine. Le produit reconditionné (*remanufacturé*) doit en effet atteindre une qualité au moins égale à celle d'un produit neuf. Le produit sortant est la combinaison de pièces réutilisées, réparées (remises à neuf) et neuves.

Récupération d'énergie Utilisation des déchets combustibles comme un moyen de génération d'énergie par incinération directe avec ou sans autre déchet mais avec récupération de la chaleur. (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2005)

Recyclage Le recyclage désigne 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. (« Code de l'environnement | Legifrance » s. d.)

Réemploi Toute opération par laquelle des produits ou des composants qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus. (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2008)

Refurbishment (voir *Remise à neuf*)

Régénération Opération basée sur des procédés de raffinage d'un fluide ou d'un solide, impliquant l'extraction de la fraction polluante ou indésirable contenue dans le déchet. (France, Commissariat général au développement durable, et Service de l'économie 2012)

Remise à neuf Procédé de restauration des composants à un état fonctionnel satisfaisant les spécifications d'origine. Ces corrections restent toutefois le plus souvent esthétiques (p. ex. resurfaçage, changement de carter, etc.).

Rendement Taux comparant les résultats réellement obtenus à ceux théoriquement atteignables.

REP (voir *Filières à responsabilité élargie du producteur*)

Retrofit (voir *Montée en gamme*)

Réusinage (traduction littérale de *Remanufacturing* ; voir *Reconditionnement*)

Réutilisation Opération par laquelle des substances, matières ou produits devenus des déchets sont utilisés de nouveau. (« Code de l'environnement | Legifrance » s. d.)

Scénario Variantes d'une étude modèle (p. ex. séquences de traitement d'un produit en fin de vie) comparées les unes aux autres (p. ex. scénarios comparés lors d'une analyse de cycle de vie). (Jolliet, Saadé, et Crettaz 2010)

Scénario de fin de vie Représentation de la réalité ou d'une situation hypothétique à partir de l'ensemble des opérations de traitement à réaliser pour un produit ou ses constituants dans un contexte géographique et temporel donnés.

Sous-produit Substance ou objet issu d'un processus de production dont le but premier n'est pas la production dudit bien peut être considérée comme un sous-produit et non comme un déchet, si :

- l'utilisation ultérieure est certaine et légale ;
- il peut être utilisé directement sans traitement supplémentaire ;
- il est produit en faisant partie intégrante d'un processus de production. (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2008)

Taux Désigne le rapport quantitatif de deux grandeurs de même nature. Il est sans unité, et le plus souvent exprimé en pourcentage.

Taux de collecte Pourcentage massique de produits en fin de vie collectés sur l'ensemble des produits en fin de vie (gisement estimé).

Taux de recyclabilité Pourcentage massique (fraction massique, en pourcent) d'un produit qui pourrait être potentiellement recyclé, réutilisé, ou les deux. (ISO 2002)

Taux de recyclage Pourcentage massique (fraction massique, en pourcent) d'un produit (famille de produits ou matériau) effectivement recyclé dans les filières de traitement de produit en fin de vie existantes.

Taux de valorisabilité Pourcentage massique (fraction massique, en pourcent) d'un produit qui pourrait être potentiellement valorisé. (ISO 2002)

Taux de valorisation Pourcentage massique (fraction massique, en pourcent) d'un produit (famille de produits

ou matériau) réellement valorisé (tous types de valorisation confondus : fonctionnelle, matière et énergétique) dans les filières de traitement du produit en fin de vie de vie existantes.

Traitement Toute opération de valorisation ou d'élimination, y compris la préparation qui précède la valorisation ou l'élimination. (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2008)

Transformation (de la) matière Toute opération de valorisation dite *matière* qui n'appartient pas au périmètre du recyclage (p. ex. fabrication des combustibles solides de récupération, opérations de remblaiement, etc.).

Tri Sous-étape du processus de recyclage. Dans cette étape, les particules sont séparées selon le type de matériau (p. ex. matériaux ferreux, non ferreux, plastiques, etc.).

Upgrading (voir *Montée en gamme*)

Utilisation Phase du cycle de vie faisant référence à la période où le produit est utilisé (c.-à-d. de son achat jusqu'au moment où le dernier détenteur s'en défait). Cette phase comprend toutes les opérations assurant d'augmenter sa durée de vie comme la maintenance (curative et préventive), la montée en gamme (modernisation) et le réemploi (revente, don, partage, mutualisation, etc.).

Valeur Jugement porté par le client ou l'utilisateur sur la base de ses attentes et motivations (Afnor 2014) et qui ne se limite pas au prix car elle sera ainsi d'autant plus grande qu'il satisfera les attentes du client pour des coûts associés aussi faibles que possible.

Valeur ajoutée Cette valeur consiste en toute transformation (amélioration) qui apporte à l'artéfact une valeur supplémentaire, le plus souvent économique. Elle dépend alors de sa nature propre (c.-à-d. de ses constituants, de ses matériaux constitutifs), mais aussi de sa fonction.

Valorisabilité Capacité conjointe du produit en fin de vie et de la filière de traitement associée à recouvrer les propriétés techniques et la valeur économique du produit complet, de ses composants et/ou de ses matériaux constitutifs. Les opérations de valorisation fonctionnelle d'abord, matière ensuite et énergétique enfin (dont la pertinence environnementale doit être validée pour chacune) suivent donc une logique d'échelle et de hiérarchisation.

Valorisation Toute opération dont le résultat principal est que des déchets servent à des fins utiles par substitution à d'autres substances, matières ou produits qui auraient été utilisés à une fin particulière, ou que des déchets soient préparés pour être utilisés à cette fin, y compris par le producteur de déchets. (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2008)

Valorisation énergétique Mode de traitement qui consiste à utiliser la chaleur générée par la combustion des déchets pour produire de l'énergie.

Valorisation fonctionnelle Forme de valorisation visant à préserver la valeur ajoutée fonctionnelle du produit.

Valorisation matière Forme de valorisation visant à préserver la valeur propre des constituants du produit.

Véhicule hors d'usage (VHU) Véhicule qui constitue un déchet car le détenteur se défait ou a l'obligation de se défaire en vertu des dispositions nationales en vigueur. (Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne 2000)

VHU (voir *Véhicule hors d'usage*)

Annexe 2

Nomenclature du Fairphone 2®

La nomenclature par composants du Fairphone 2® est détaillée au tableau 128 page suivante, et par matériaux au tableau 129.

Module	Composant	Masse (g)	Référence	Matériau	Référence
Module écran		5,25E+01	(Fraunhofer IZM 2016)		
	Ecran	3,67E+01	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (LCD)	(Hischier et Lehmann 2007)
	Pièce conductrice de la plaque arrière	3,23E+00		Magnésium (Mg)	(Fairphone 2016)
	Loquet de verrouillage du module écran	8,09E-01		Polycarbonate (PC)	(Fairphone 2019a)
	Plaque arrière du module écran	1,08E+01	(Fraunhofer IZM 2016)	Polycarbonate (PC)	(Fairphone 2019a)
	Circuit imprimé du module écran	9,55E-01	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (PCB)	(Szałatkiewicz 2014)
	Connecteur du module écran (POGO contacts)	2,25E-03	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (POGO contacts)	(Fraunhofer IZM 2016)
Module supérieur		6,50E+00	(Fraunhofer IZM 2016)		
	Partie avant du boîtier du module supérieur	2,29E+00	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (Plastique PC Mix)	(Fraunhofer IZM 2016)
	Partie arrière du boîtier du module supérieur	1,55E+00	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (Plastique PA Mix)	(Fraunhofer IZM 2016)
	Plaque de mise à terre du module supérieur	1,10E+00	(Fraunhofer IZM 2016)	Acier inoxydable	(Fraunhofer IZM 2016) (Fairphone 2016)
	Circuit imprimé du module supérieur	8,75E-01		Divers (PCB)	(Szałatkiewicz 2014)
	Connecteur du module supérieur (POGO contacts)	2,25E-03	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (POGO contacts)	(Fraunhofer IZM 2016)
	Enceinte module supérieur	3,50E-01	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (Enceinte écouteur)	(Güvendik 2014)
	Caméra frontale	3,38E-01	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (caméra)	
Module caméra		3,80E+00	(Fraunhofer IZM 2016)		
	Partie avant du boîtier du module caméra	4,52E-01		Divers (Plastique PC Mix)	
	Partie arrière du boîtier du module caméra	1,42E+00	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (Plastique PA Mix)	(Fraunhofer IZM 2016)
	Plaque de mise à terre/de blindage du module caméra	6,88E-01	(Fraunhofer IZM 2016)	Acier inoxydable	(Fraunhofer IZM 2016) (Fairphone 2016)
	Circuit imprimé du module caméra	4,45E-01	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (PCB)	(Szałatkiewicz 2014)
	Connecteur du module caméra (POGO contacts)	2,25E-03	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (POGO contacts)	(Fraunhofer IZM 2016)
	Caméra	7,91E-01	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (caméra)	
Module inférieur		9,20E+00	(Fraunhofer IZM 2016)		
	Partie avant du boîtier du module inférieur	1,10E+00	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (Plastique PC Mix)	(Fraunhofer IZM 2016)
	Partie arrière du boîtier du module inférieur	2,71E+00	(Fraunhofer IZM 2016)	Polycarbonate (PC)	(Fairphone 2019a)
	Plaque de mise à terre du module inférieur	1,20E+00	(Fraunhofer IZM 2016)	Acier inoxydable	(Fairphone 2016)
	Circuit imprimé du module inférieur	1,32E+00	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (PCB)	(Szałatkiewicz 2014)
	Connecteur du module inférieur (POGO contacts)	5,45E-03	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (POGO contacts)	(Fraunhofer IZM 2016)
	Enceinte	1,35E+00	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (enceinte)	(Güvendik 2014)
	Moteur vibrant	9,23E-01	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (moteur)	
	Étanchéité du module inférieur			Caoutchouc	
	Cabine de microphone	5,94E-01		Caoutchouc	(Fairphone 2016)
Module central		4,00E+01	(Fraunhofer IZM 2016)		
Module calcul	Circuit imprimé du module central	1,59E+01	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (PCB)	(Szałatkiewicz 2014)
	Connecteur du module écran (POGO pins)	7,80E-01	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (POGO pins)	(Fraunhofer IZM 2016)
	Connecteur du module inférieur (POGO pins)	4,70E-01	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (POGO pins)	(Fraunhofer IZM 2016)
	Connecteur du module caméra (POGO pins)	8,30E-01	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (POGO pins)	(Fraunhofer IZM 2016)
	Connecteur du module supérieur (POGO pins)	8,30E-01	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (POGO pins)	(Fraunhofer IZM 2016)
	Port d'expansion (POGO pins)	1,30E-01	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (POGO pins)	(Fraunhofer IZM 2016)
	Contacts sous pins (POGO contacts)	1,78E-02	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (POGO contacts)	(Fraunhofer IZM 2016)

Module	Composant	Masse (g)	Référence	Matériau	Référence
Module antennes	Circuit imprimé du module boutons volume, power et caméra	1,41E-01	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (PCB Flexible)	(Macleod et Knowledge 2002)
	Plaque de mise à terre du module central	3,60E+00		Acier inoxydable	(Fairphone 2016)
	Dissipateur de chaleur	1,10E+00		Graphite	(Fairphone 2016)
	Châssis	1,03E+01	(Güvendik 2014)	Polycarbonate (PC)	(Güvendik 2014)
	Cadre	4,73E+00	(Güvendik 2014)	Polycarbonate (PC)	(Güvendik 2014)
	Câble d'antenne coaxial	1,90E-01	(Güvendik 2014)	Divers (Antenne coaxiale)	
	Circuit antenne coaxiale	4,80E-01	(Fraunhofer IZM 2016) (Hischier et al. 2007)	Divers (PCB)	(Szałatkiewicz 2014)
	Mise à terre de l'antenne coaxiale	1,80E-01	(Fraunhofer IZM 2016) (Hischier et al. 2007)	Divers (PCB)	(Szałatkiewicz 2014)
	Antenne cellulaire principale				
	Antenne Wi-Fi/Bluetooth				
Antenne haute mimo	3,73E-01	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (PCB Flexible)	(Macleod et Knowledge 2002)	
Antenne GPS					
Antenne basse mimo					
Module batterie		3,80E+01	(Fraunhofer IZM 2016)		
	Batterie	3,80E+01	(Fraunhofer IZM 2016)	Divers (Batterie)	(Fraunhofer IZM 2016)
Module arrière		2,01E+01	(Fraunhofer IZM 2016)		
	Coque arrière	1,57E+01	(Fraunhofer IZM 2016) (Fairphone 2018a)	Polycarbonate (PC)	(Fairphone 2019a)
	Bord d'étanchéité de la coque arrière	4,00E+00	(Fraunhofer IZM 2016)	Polyuréthane thermoplastique (TPU)	(Fairphone 2019a)
	Joint de pression de batterie de la coque arrière	4,00E-01		Polycarbonate (PC)	(Fairphone 2019a)
	Bord d'étanchéité de la caméra			Polycarbonate (PC)	(Fairphone 2019a)

Tableau 128. Nomenclature du Fairphone 2® (composants)

Annexe 2

Nomenclature du Fairphone 2®

Catégorie	Masse (g)	%	Matériau	Masse (g)	%
Métaux ferreux	8,34E+00	4,90	Acier inoxydable	6,58E+00	3,87E+00
			Fe (fer)	1,75E+00	1,03E+00
Métaux non ferreux	9,92E+00	5,83	Ag (argent)	7,40E-02	4,35E-02
			Al (aluminium)	1,13E-02	6,64E-03
			Au (or)	2,52E-02	1,48E-02
			Co (cobalt)	2,57E-03	1,51E-03
			Cu (cuivre)	4,74E+00	2,78E+00
			Cr (chrome)	3,40E-02	2,00E-02
			Mg (magnésium)	3,23E+00	1,90E+00
			Mn (manganèse)	3,24E-01	1,90E-01
			Ni (nickel)	3,87E-01	2,28E-01
			Pb (plomb)	1,22E-01	7,19E-02
			Pd (palladium)	4,93E-03	2,90E-03
			Pt (platine)	2,77E-03	1,63E-03
			Si (silicium)	2,95E-02	1,73E-02
			Sn (étain)	2,04E-01	1,20E-01
			W (tungstène)	4,71E-01	2,77E-01
			Zn (zinc)	2,55E-01	1,50E-01
			Terres rares	6,65E-02	0,04
Nd (neodymium)	6,17E-02	3,63E-02			
Pr (praseodymium)	3,11E-03	1,83E-03			
Non métaux (éléments)	1,76E-02	0,01	P (phosphore)	1,76E-02	1,04E-02
Plastiques	5,74E+01	33,77	PC (polycarbonate)	4,54E+01	2,67E+01
			PE (polyéthylène)	1,62E-02	9,55E-03
			PVC (polychlorure de vinyle)	2,28E-02	1,34E-02
			TPU (polyuréthane thermoplastique)	4,00E+00	2,35E+00
			PC Mix (polycarbonate + fibre de verre)	3,84E+00	2,26E+00
			PA Mix (polyamide + fibre de verre)	2,97E+00	1,74E+00
			Autres plastiques (COC, PSU et PBT*)	4,23E-01	2,49E-01
			Plastique non défini (ABS*)	7,45E-01	4,38E-01
Polymères (hors plastiques)	1,06E+01	6,20	Caoutchouc	5,94E-01	3,49E-01
			Epoxy	8,57E+00	5,04E+00
			Polyimide (PI)	2,36E-01	1,39E-01
			Polymère à cristaux liquides (LCP)	1,15E+00	6,76E-01
Verre	3,56E+01	20,93	Verre	3,56E+01	2,09E+01
Graphite	1,02E+01	6,01	Graphite	1,02E+01	6,01E+00
Autres	3,79E+01	22,30	Couche ITO	5,14E-02	3,02E-02
			Cristal liquide	3,56E-01	2,09E-01
			LCO	1,41E+01	8,27E+00
			LiPF6	5,32E+00	3,13E+00
			Autres	1,81E+01	1,07E+01

Tableau 129. Nomenclature du Fairphone 2® (matériaux)

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdullah, Ahmad Baharuddin, M. S. Yusoff, et Zaidi Mohd Ripin. 2006. « Integration Of Design For Modularity And Design For Assembly To Enhance Product Maintainability. » In . University Malaya. <http://eprints.usm.my/1480/>.
- ADEME. 2002. *Bilan des connaissances environnementales sur les filières de recyclage: l'état des connaissances ACV*. Paris; Ivry-sur-Seine (1 rue Berthelot, 94200): ADEME ; BIO intelligence sevic.
- . 2005. « Biodégradabilité et matériaux polymères biodégradables ». Note de synthèse.
- . 2011. « Produits, procédés et services éco-conçus ». Feuille de route stratégique.
- . 2012. « Recyclage en France : bilan annuel - données 2010 ». France: ADEME. <http://www.ademe.fr/recyclage-france-bilan-annuel-donnees-2010>.
- . 2013a. « Etude sur le bilan du traitement des déchets d'activités de soins à risques infectieux en France - Données 2011 ». France: ADEME.
- . 2013b. « Rapport annuel lubrifiants (synthèse) - Données 2012 ». Repères. France: ADEME.
- . 2014a. « Economie circulaire: Notions ».
- . 2014b. « Rapport annuel emballages industriels, commerciaux et ménagers (synthèse) - Données 2012 ». Repères. France: ADEME.
- . 2014c. « Rapport annuel emballages ménagers (synthèse) - Données 2013 ». Repères. France: ADEME.
- . 2014d. « Rapport annuel de l'observatoire des fluides frigorigènes - Données 2013 ». Repères. France: ADEME.
- . 2015a. « Les filières à responsabilité élargie du producteur - Panorama ».
- . 2015b. « Méthanisation ». Fiche Technique.
- . 2015c. « Observatoire de la filière Véhicules hors d'usage. Année 2013. » France: Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME).
- . 2015d. « Rapport annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques - Données 2014 ». Faits & chiffres. France: ADEME.
- . 2015e. « Rapport annuel papiers graphiques ménagers et assimilés - Données 2013 ». Repères. France: ADEME.

- . 2015f. « Le compostage ». Fiche Technique.
- . 2015g. « Rapport annuel textiles d'habillement, linge de maison et chaussures des ménages - Données 2014 ». Repères. France: ADEME.
- . 2016a. « Chiffres-clés déchets - édition 2016 ».
- . 2016b. « Rapport annuel pneumatiques (synthèse) - Données 2014 ». Repères. France: ADEME.
- . 2016c. « Rapport annuel de la filière des déchets d'éléments d'ameublement - Données 2015 ». Faits & chiffres. France: ADEME.
- . 2016d. « Rapport annuel piles et accumulateurs - Données 2015 ». Repères. France: ADEME.
- . 2016e. « Rapport annuel de l'observatoire de la filière des véhicules hors d'usage - Données 2014 ». France: ADEME.
- . 2016f. « Prévention de la production des déchets - Bilan 2016 ». <https://www.ademe.fr/prevention-production-dechets>.
- . 2017a. *Les filières à responsabilité élargie du producteur: panorama*. Angers: ADEME.
- . 2017b. « Médicaments - Données 2015 ». Synthèse. Faits et chiffres.
- . 2017c. « Rapport annuel produits chimiques des ménages (synthèse) - Données 2015 ». Faits & chiffres. France: ADEME.
- . 2017d. « Méthanisation: Feuille de route stratégique ». Horizons.
- . 2017e. « Les énergies renouvelables et de récupération ». Fiche Technique.
- . 2018. « Mon vieux téléphone est-il vraiment recyclé ? - Composition et traitement d'un téléphone portable ».
- . 2019a. « Comment réalise-t-on une ACV ? » ADEME. 2019. <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/comment-realise-t-acv>.
- . 2019b. « Déchets chiffres-clés - 2017 ». Faits et chiffres. <https://www.ademe.fr/dechets-chiffres-cles>.
- . 2019c. « Déchets chiffres-clés : L'essentiel 2018 ». Synthèse. Faits et Chiffres.
- . s. d. « Le traitement des déchets ». Consulté le 21 juin 2019a. <https://www.ademe.fr/expertises/dechets/quoi-parle-t/prevention-gestion-dechets/traitement-dechets>.
- . s. d. « Nos expertises, Déchets, Passer à l'action, Valorisation de la matière ». ADEME. Consulté le 2 juillet 2016b. <http://www.ademe.fr/expertises/dechets/passer-a-laction/valorisation-matiere>.
- ADEME, et Bio by Deloitte. 2017. « Bilan National du Recyclage 2005-2014 ».
- ADEME, Erwann Fangeat, Clément Chauvin, et Pôle usage et durée de vie. s. d. « Allongement de la durée de vie des produits ».
- ADEME, Erwann FANGEAT, Deloitte Développement Durable, Alice DEPROUW, Marion JOVER, Sarah CHOUVENC, et Alexandra PENSEC. 2018. « Rapport Annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques ». Expertises. France: ADEME.
- ADEME, et France Nature Environnement. 2019. « Les impacts du smartphone - Un téléphone pas si « smart » pour l'environnement ».
- Aengenheyster, Matthias, Qing Yi Feng, Frederick van der Ploeg, et Henk A. Dijkstra. 2018. « The Point of No Return for Climate Action: Effects of Climate Uncertainty and Risk Tolerance ». *Earth System Dynamics* 9 (3): 1085-95. <https://doi.org/10.5194/esd-9-1085-2018>.
- AFNOR. 2000. *NF EN 13432 Emballage - Exigences relatives aux emballages valorisables par compostage et biodégradation - Programme d'essai et critères d'évaluation de l'acceptation finale des emballages*.
- . 2001. « NF EN 13306 - Terminologie de la maintenance ».
- Afnor. 2002. « NF U 44-095 - Amendements organiques. Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux ».

- — —. 2003. « NF X50-110. Qualité en expertise. Prescriptions générales de compétence pour une expertise ». Norme.
- — —. 2006. « NF U 44-051 - Amendements organiques. Dénominations spécifications et marquage ».
- AFNOR. 2013. « NF X30-264 - Management environnemental - Aide à la mise en place d'une démarche d'éco-conception ».
- Afnor. 2014. « NF EN 1325. Management de la valeur. Vocabulaire. Termes et définitions ». Norme. Afnor Editions.
- Agrawal, Vishal V., Atalay Atasu, et Sezer Ülkü. 2016. « Modular Upgradability in Consumer Electronics: Economic and Environmental Implications ». *Journal of Industrial Ecology* 20 (5): 1018-24. <https://doi.org/10.1111/jiec.12360>.
- Aguiar, Jéssica de, Luana de Oliveira, José Oliveira da Silva, Danielle Bond, Régis Kovacs Scalice, et Daniela Becker. 2017. « A design tool to diagnose product recyclability during product design phase ». *Journal of Cleaner Production* 141 (Supplement C): 219-29. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.074>.
- Alonso Movilla, Natalia, Peggy Zwolinski, François Barnabé, Cyrille Dalla Zuanna, et Vincent Moulin. 2013. « Considering Real End-of-Life Scenarios in a Design for Disassembly Methodology ». In *CIRP Global Conference on Sustainable Manufacturing*, 314-19. Berlin, France. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00903865>.
- Ardente, Fulvio, Giorgio Beccali, et Maurizio Cellura. 2003. « Eco-sustainable energy and environmental strategies in design for recycling: the software "ENDLESS" ». *Ecological Modelling* 163 (1): 101-18. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(02\)00418-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(02)00418-0).
- Ardente, Fulvio, et Fabrice Mathieux. 2014. « Identification and assessment of product's measures to improve resource efficiency: the case-study of an Energy using Product ». *Journal of Cleaner Production* 83 (novembre): 126-41. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.058>.
- Ardente, Fulvio, Fabrice Mathieux, Laura Talens Peiró, European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability. 2013. *Environmental Footprint and Material Efficiency Support for Product Policy: Report on Benefits and Impacts/Costs of Options for Different Potential Material Efficiency Requirements for Electronic Displays*. Luxembourg: Publications Office. <http://dx.publications.europa.eu/10.2788/28569>.
- Arrêté du 18 décembre 1992 relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés pour les installations existantes. s.d. Consulté le 1 juillet 2016. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000006081991&dateTexte=20030415>.
- Assemblée Nationale, et Sénat. 2015. *Loi n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte. 2015-992*.
- A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering: AtoZ. 2006. Vol. E. Begellhouse.
- Azevedo, Susana G., Helena Carvalho, et V. Cruz Machado. 2011. « The influence of green practices on supply chain performance: A case study approach ». *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 47 (6): 850-71. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.05.017>.
- Aziz, N. A., D. A. Wahab, R. Ramli, et C. H. Azhari. 2016. « Modelling and optimisation of upgradability in the design of multiple life cycle products: a critical review ». *Journal of Cleaner Production* 112 (janvier): 282-90. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.076>.
- Baranzelli, Claudia, Darina Blagoeva, Gian Andrea Blengini, Constantin Ciupagea, Jo Dewulf, Patricia Dias, Yildirim Kayam, et al. 2017. *Methodology for Establishing the EU List of Critical Raw Materials: Guidelines*. <http://dx.publications.europa.eu/10.2873/769526>.
- Barrett, Richard T. 1990. « Fastener Design Manual ». <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19900009424>.
- Beamon, Benita M. 1999a. « Measuring supply chain performance ». *International Journal of Operations & Production Management* 19 (3): 275-92. <https://doi.org/10.1108/01443579910249714>.
- — —. 1999b. « Designing the green supply chain ». *Logistics Information Management* 12 (4): 332-42.

- <https://doi.org/10.1108/09576059910284159>.
- Bevilacqua, M., F. E. Ciarapica, et G. Giacchetta. 2008. « Design for environment as a tool for the development of a sustainable supply chain ». *International Journal of Sustainable Engineering* 1 (3): 188-201. <https://doi.org/10.1080/19397030802506657>.
- Blengini, Gian Andrea, Darina Blagoeva, Jo Dewulf, Claudia Baranzelli, Cristina Torres De Matos, David Pennington, Beatriz Vidal-Legaz, et al. 2017. *Assessment of the Methodology for Establishing the EU List of Critical Raw Materials Background Report*.
- BLEU SAFRAN, Charlotte HUGREL, et Magali PALLUAU. 2017. « ICV de la gestion de fin de vie des matériaux constitutifs des équipements électriques et électroniques ». Synthèse.
- Bobba, Silvia, Fabrice Mathieux, Fulvio Ardente, Gian Andrea Blengini, Maria Anna Cusenza, Andreas Podias, et Andreas Pfrang. 2018. « Life Cycle Assessment of repurposed electric vehicle batteries: an adapted method based on modelling energy flows ». *Journal of Energy Storage* 19 (octobre): 213-25. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.07.008>.
- Bos, Ulrike, Rafael Horn, Tabea Beck, Jan Paul Lindner, et Matthias Fischer. 2016. *LANCA - Characterization Factors for Life Cycle Impact Assessment: Version 2.0*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Bras, Bert. 2007. *Design for remanufacturing processes*. Wiley, Hoboken, NJ. <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=28QNI8XnPmYC&oi=fnd&pg=PA283&dq=bras+2007+d+esign+for+manufacturing+processes&ots=1-XQBqjI6T&sig=CtLfaBEZQrKuHxdn-XZA-Uw3yys>.
- Brundtland, Gro, Mansour Khalid, Susanna Agnelli, Sali Al-Athel, Bernard Chidzero, Lamina Fadika, Volker Hauff, et al. 1987. *Our Common Future ('Brundtland report')*. Oxford University Press, USA. http://www.bne-portal.de/fileadmin/unesco/de/Downloads/Hintergrundmaterial_international/Brundtlandbericht.File.pdf?linklisted=2812.
- Caelen, Jean, éd. 2013. *Le consommateur au cœur de l'innovation*. Sociologie. Paris: CNRS Éditions. <http://books.openedition.org/editions-cnrs/1539>.
- Canals Casals, Lluç, Mattia Barbero, et Cristina Corchero. 2019. « Reused second life batteries for aggregated demand response services ». *Journal of Cleaner Production* 212 (mars): 99-108. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.005>.
- Carter, Alfred D. S. 1986. *Mechanical reliability*. 2. ed. Basingstoke: Macmillan.
- CEA. 2018. « Mémento sur l'énergie - Edition 2018 ».
- Chan, F. T. S. 2003. « Performance Measurement in a Supply Chain ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 21 (7): 534-48. <https://doi.org/10.1007/s001700300063>.
- Chancerel, Perrine, Max Marwede, Fabrice Mathieux, et Laura Talens Peirò. 2016. « Feasibility study for setting-up reference values to support the calculation of recyclability / recoverability rates of electr(on)ic products ». JRC Technical Reports. Joint Research Center.
- Chancerel, Perrine, et Susanne Rotter. 2009. « Recycling-oriented characterization of small waste electrical and electronic equipment ». *Waste Management* 29 (8): 2336-52. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.04.003>.
- Chemineau, Léonard. 2011. « Développement d'une méthode d'éco-conception basée sur la modélisation et l'évaluation des filières de valorisation : application au secteur automobile. » Phdthesis, Arts et Métiers ParisTech. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00604000/document>.
- Chen, Rosy Wei, D. Navin-Chandra, et F. B. Print. 1994. « A cost-benefit analysis model of product design for recyclability and its application ». *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A* 17 (4): 502-7. <https://doi.org/10.1109/95.335032>.
- Chopra, Sunil, et Peter Meindl. 2008. *Administración de la cadena de suministro: estrategia, planeación y operación*. México, D.F., México: Prentice Hall/Pearson/Alhambra.
- « Code de l'environnement | Legifrance ». s. d. Consulté le 29 juin 2016. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000006074220>.
- Commissariat général au développement durable, et de l'évaluation et de l'intégration du développement durable Service de l'économie. 2012. *Lexique à l'usage des acteurs de la gestion des déchets*. La

- Défense: Commissariat général au développement durable, Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable.
- Commission Européenne. 2015. « Boucler la boucle - Un plan d'action de l'Union européenne en faveur de l'économie circulaire ».
- . 2016. « Accord de Paris ». Text. Action Pour Le Climat - European Commission. 23 novembre 2016. https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_fr.
- . 2017. « Communication on the 2017 list for Critical Raw Materials for the EU ».
- . 2018. « A European Strategy for Plastics in a Circular Economy ».
- Conseil de l'Union Européenne. 1999. *Directive 1999/31/CE concernant la mise en décharge des déchets*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:31999L0031&from=FR>.
- Coughlan, Damian, Colin Fitzpatrick, et Muireann McMahon. 2018. « Repurposing end of life notebook computers from consumer WEEE as thin client computers – A hybrid end of life strategy for the Circular Economy in electronics ». *Journal of Cleaner Production* 192 (août): 809-20. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.029>.
- Da Silva, Laurent, et Marc Santugini. 2009. « Qu'est-ce que la productivité? » HEC Montréal.
- Dombrowski, Uwe, Stefan Schmidt, et Kai Schmidtchen. 2014. « Analysis and Integration of Design for X Approaches in Lean Design as basis for a Lifecycle Optimized Product Design ». *Procedia CIRP*, 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering, 15 (janvier): 385-90. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.023>.
- Dostatni, Ewa, Jacek Diakun, Damian Grajewski, Radosław Wichniarek, et Anna Karwasz. 2016. « Multi-Agent System to Support Decision-Making Process in Design for Recycling ». *Soft Computing* 20 (11): 4347-61. <https://doi.org/10.1007/s00500-016-2302-z>.
- Dowie, Tracy, et Matthew Simon. 1994. « Guidelines for designing for disassembly and recycling », septembre.
- Eco3e. 2016. « Plastics ». novembre 2016. <http://eco3e.eu/en/base/plastics/>.
- Ellen MacArthur Foundation. 2015. « Circularity Indicators: An Approach to Measuring Circularity - Methodology ».
- . 2016. « Vers une économie circulaire: Arguments économiques pour une transition accélérée ».
- ESU-services. 2018. « Description of life cycle impact assessment methods ».
- European Commission - JRC - IES. 2010a. « ILCD Handbook: Framework and Requirements for LCIA Models and Indicators ».
- . 2010b. « ILCD Handbook: General Guide for Life Cycle Assessment - Detailed Guidance ».
- European Commission, et Industry Directorate-General for Internal Market Entrepreneurship and SMEs. 2018. *Raw Materials Scoreboard 2018: European Innovation Partnership on Raw Materials*. <http://dx.publications.europa.eu/10.2873/08258>.
- Eurostat. s. d. « Circular material use rate ». Consulté le 13 août 2019. https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/cei_srm030.
- Fairphone. 2013. « Transparency: a Mission and a Challenge ». Fairphone. 26 juillet 2013. <https://www.fairphone.com/es/2013/07/26/transparency-a-mission-and-a-challenge/>.
- . 2015. « Fairphone 2 Technical Specifications ».
- . 2016. European Patent Application. European Patent Office EP 3 104 250 A1, issued 14 décembre 2016.
- . 2017. « Fairphone's Report on Recyclability ».
- . 2018a. « Impact Report Vol. 1 ».
- . 2018b. « Digging into the recycled material chains ». 26 avril 2018. <https://www.fairphone.com/es/2018/04/26/digging-into-the-recycled-material-chains/>.
- . 2019a. « What Are the Technical Specifications of the Fairphone 2? » Support. 2019. <http://support.fairphone.com/hc/en-us/articles/203478389-What-are-the-technical-specifications-of->

- the-Fairphone-2-.
- . 2019b. « Refurbished phones give valuable resources a new life ». Fairphone. 16 avril 2019. <https://www.fairphone.com/en/2019/04/16/refurbished-phones-give-valuable-resources-a-new-life/>.
- . s. d. « Upgrade Fairphone 2 Camera ». Fairphone. Consulté le 28 septembre 2019. <https://www.fairphone.com/en/upgrade-fairphone2-camera/>.
- Fastenal. 2009. « Corrosion & Corrosion Resistance ».
- Fazio, Simone, Valentina Castellani, Serenella Sala, Erwin Schau, Michela Secchi, Luca Zampori, et Edward Diaconu. 2018. « Supporting Information to the Characterisation Factors of Recommended EF Life Cycle Impact Assessment Methods: New Methods and Differences with ILCD ». EUR - Scientific and Technical Research Reports. Publications Office of the European Union. JRC109369. <https://doi.org/10.2760/671368>.
- Fleischmann, Mortiz, Hans Ronald Krikke, Rommert Dekker, et Simme Douwe P. Flapper. 2000. « A characterisation of logistics networks for product recovery ». *Omega* 28 (6): 653-66. [https://doi.org/10.1016/S0305-0483\(00\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0305-0483(00)00022-0).
- Frad, Adel, et Ioan Revnic. 2007. « Prodtect automotive - Meeting the requirements of ELV ». In , 8. Paris, France.
- France, Commissariat général au développement durable, et de l'évaluation et de l'intégration du développement durable Service de l'économie. 2012. *Lexique à l'usage des acteurs de la gestion des déchets*. La Défense: Commissariat général au développement durable, Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable.
- Franz, Manuela. 2010. « Life cycle aspects of the environmental impact of electrical and electronic equipment from the European point of view ». In *33rd International Spring Seminar on Electronics Technology, ISSE 2010*, 439-42. Warsaw, Poland: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISSE.2010.5547354>.
- Fraunhofer IZM. 2016. « Life Cycle Assessment of the Fairphone 2 ». Fraunhofer IZM. https://www.researchgate.net/publication/311425397_Life_Cycle_Assessment_of_the_Fairphone_2.
- Frischknecht, R., A. Braunschweig, P. Hofstetter, et P. Suter. 2000. « Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment ». *Environmental Impact Assessment Review* 20 (2): 159-89. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(99\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(99)00042-6).
- Gan, Xiaoyu, Ignacio C. Fernandez, Jie Guo, Maxwell Wilson, Yuanyuan Zhao, Bingbing Zhou, et Jianguo Wu. 2017. « When to use what: Methods for weighting and aggregating sustainability indicators ». *Ecological Indicators* 81 (octobre): 491-502. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.068>.
- Gibert, Patrick. 1980. *Le contrôle de gestion dans les organisations publiques*. Les Editions d'organisation, Collection Management public. Paris.
- Go, T. F., D. A. Wahab, et H. Hishamuddin. 2015. « Multiple generation life-cycles for product sustainability: the way forward ». *Journal of Cleaner Production* 95 (mai): 16-29. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.065>.
- Govindan, Kannan, Hamed Soleimani, et Devika Kannan. 2015. « Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future ». *European Journal of Operational Research* 240 (3): 603-26. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>.
- Grimaud, Guilhem. 2019. « Conception des scénarios de recyclage pilotée par l'évaluation des performances des procédés ».
- Guide, V. Daniel R., et Luk N. Van Wassenhove. 2009. « OR FORUM—The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research ». *Operations Research* 57 (1): 10-18. <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0628>.
- Guinee, Jeroen B, Hans de Bruijn, Robbert van Duin, et Mark A. J Huijbregts. 2002. *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*. <https://doi.org/10.1007/0-306-48055-7>.
- Gunasekaran, A., C. Patel, et Ronald E. McGaughey. 2004. « A framework for supply chain performance measurement ». *International Journal of Production Economics, Supply Chain Management for the 21st Century Organizational Competitiveness*, 87 (3): 333-47. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.08.003>.

- Gunasekaran, A., C. Patel, et E. Tirtiroglu. 2001. « Performance measures and metrics in a supply chain environment ». *International Journal of Operations & Production Management* 21 (1/2): 71-87. <https://doi.org/10.1108/01443570110358468>.
- Güvendik, Merve. 2014. « From Smartphone to Futurephone: Assessing the Environmental Impacts of Different Circular Economy Scenarios of a Smartphone Using LCA ».
- Hagelüken, C. 2006. « Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling - a holistic approach for interface optimisation between pre-processing and integrated metals smelting and refining ». In *Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2006.*, 218-23. <https://doi.org/10.1109/ISEE.2006.1650064>.
- Hagelüken, Christian. 2006. « Recycling of Electronic Scrap at Umicore's Integrated Metals Smelter and Refinery ». *World of Metallurgy - ERZMETALL* 59: 152-61.
- Hatcher, G. D., W. L. Ijomah, et J. F. C. Windmill. 2011. « Design for remanufacture: a literature review and future research needs ». *Journal of Cleaner Production* 19 (17): 2004-14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.06.019>.
- . 2013. « Integrating design for remanufacture into the design process: the operational factors ». *Journal of Cleaner Production* 39 (janvier): 200-208. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.015>.
- Hiraki, Takehito, Osamu Takeda, Kenichi Nakajima, Kazuyo Matsubae, Shinichiro Nakamura, et Tetsuya Nagasaka. 2011. « Thermodynamic Criteria for the Removal of Impurities from End-of-Life Magnesium Alloys by Evaporation and Flux Treatment ». *Science and Technology of Advanced Materials* 12 (3): 035003. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/12/3/035003>.
- Hischier, Roland, Mischa Classen, Martin Lehmann, et Wolfram Scharnhorst. 2007. « Life cycle inventories of Electric and Electronic Equipment: Production, Use and Disposal. Part II - Modules ». ecoinvent report No. 18. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Hischier, Roland, et Martin Lehmann. 2007. « Life cycle inventories of Electric and Electronic Equipment: Production, Use and Disposal. Part III - Electronic Devices ». ecoinvent report No. 18. Dübendorf: Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Höltkä-Otto, Katja, Noemi A. Chiriach, Dusan Lysy, et Eun Suk Suh. 2012. « Comparative Analysis of Coupling Modularity Metrics ». *Journal of Engineering Design* 23 (10-11): 790-806. <https://doi.org/10.1080/09544828.2012.701728>.
- Höltkä-Otto, Katja, et Olivier de Weck. 2007. « Degree of Modularity in Engineering Systems and Products with Technical and Business Constraints ». *Concurrent Engineering* 15 (2): 113-26. <https://doi.org/10.1177/1063293X07078931>.
- Horta Arduin, Rachel, Guilhem Grimaud, Jorge Martínez Leal, Stéphane Pompidou, Carole Charbuillet, Bertrand Laratte, Thecle Alix, et Nicolas Perry. 2019. « Influence of Scope Definition in Recycling Rate Calculation for European E-Waste Extended Producer Responsibility ». *Waste Management* 84 (février): 256-68. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.002>.
- Huisman, J. 2003. « The QWERTY/EE Concept, Quantifying Recyclability and Eco-Efficiency for End-of-Life Treatment of Consumer Electronic Products ». <http://resolver.tudelft.nl/uuid:f29557d0-7e8d-421d-b425-ed527a6eed12>.
- Huisman, J., C. B. Boks, et A. L. N. Stevels. 2003. « Quotes for environmentally weighted recyclability (QWERTY): Concept of describing product recyclability in terms of environmental value ». *International Journal of Production Research* 41 (16): 3649-65. <https://doi.org/10.1080/0020754031000120069>.
- IEC. 2012. « Technical Report IEC/TR 62635. Guidelines for End of Life Information Provision from Manufacturers and Recyclers, and for Recyclability Rate Calculation of Electrical and Electronic Equipment ». International Electrotechnical Commission.
- iFixit. 2015. « Démontage du Fairphone 2 - iFixit ». 2015. <https://fr.ifixit.com/Tutoriel/D%C3%A9montage+du+Fairphone+2/52523>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, éd. 2014. « Anthropogenic and Natural Radiative Forcing ». In *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*, 659-740. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>.

- Ishigami, Yoshiaki, Hiroaki Yagi, Shinsuke Kondoh, Yasushi Umeda, Yoshiki Shimomura, et Masaharu Yoshioka. 2003. « Development of a design methodology for upgradability involving changes of functions ». In *Proceedings of the EcoDesign*, 3:3rd. <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1322669/>.
- Ishii, Kosuke, Charles F. Eubanks, et Patrick Di Marco. 1994. « Design for product retirement and material life-cycle ». *Materials & Design* 15 (4): 225-33. [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(94\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0261-3069(94)90007-8).
- Islam, Md Shamimul, Noorliza Karia, et Mohamed Soliman Mohamed Soliman. 2017. « A review on green supply chain aspects and practices ». *Management and Marketing* 12: 12-36. <https://doi.org/10.1515/mmcks-2017-0002>.
- ISO. 2002. « ISO 22628:2002 - Véhicules routiers - Recyclabilité et valorisabilité - Méthode de calcul ».
- . 2006a. « ISO 14040:2006 - Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Principes et cadre ». http://www.iso.org/iso/fr/catalogue_detail.htm?csnumber=37456.
- . 2006b. « ISO 14044:2006 - Management environnemental -- Analyse du cycle de vie -- Exigences et lignes directrices ». http://www.iso.org/iso/fr/catalogue_detail?csnumber=38498.
- . 2012. « ISO 14855-1:2012 - Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions - Method by analysis of evolved carbon dioxide - Part 1: General method ».
- . 2016. « ISO 14021:2016 - Marquage et déclarations environnementaux - Autodéclarations environnementales (Étiquetage de type II) ».
- . 2018. « ISO 14855-2:2018 - Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions - Method by analysis of evolved carbon dioxide - Part 2: Gravimetric measurement of carbon dioxide evolved in a laboratory-scale test ».
- Jolliet, Olivier, Myriam Saadé, et Pierre Crettaz. 2005. *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*. PPUR presses polytechniques.
- . 2010. *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Jung, Sangjin, et Timothy W. Simpson. 2017. « New Modularity Indices for Modularity Assessment and Clustering of Product Architecture ». *Journal of Engineering Design* 28 (1): 1-22. <https://doi.org/10.1080/09544828.2016.1252835>.
- Justel Lozano, Daniel. 2008. « Metodologia para la eco-innovación en el diseño para desensamblado de productos industriales ». Universitat Jaume I.
- Kararach, George, Godwell Nhamo, Maurice Mubila, Senia Nhamo, Charles Nhemachena, et Suresh Babu. 2017. « Reflections on the Green Growth Index for Developing Countries:A focus of selected African countries ». *Development Policy Review* 36. <https://doi.org/10.1111/dpr.12265>.
- Kriwet, A., E. Zussman, et G. Seliger. 1995. « Systematic integration of design-for-recycling into product design ». *International Journal of Production Economics*, Collaborative integration, 38 (1): 15-22. [https://doi.org/10.1016/0925-5273\(95\)99062-A](https://doi.org/10.1016/0925-5273(95)99062-A).
- Le Diagon, Yoann, Nicolas Perry, Stéphane Pompidou, et Reidson Pereira Gouvinhas. 2014. « Integration of End-of-Life Options as a Design Criterion in Methods and Tools for Ecodesign ». In . Toulouse, France. <http://hdl.handle.net/10985/8103>.
- Leal, J. Martínez, S. Pompidou, C. Charbuillet, et N. Perry. 2018. « Product Recoverability: A Review of Assessment Methods ». *Procedia CIRP*, 25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference, 30 April – 2 May 2018, Copenhagen, Denmark, 69: 710-15. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.061>.
- Legifrance. s.d. « Code rural et de la pêche maritime ». Consulté le 3 juillet 2019. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000006071367&dateTexte=29990101&categorieLien=cid>.
- Leończuk, Dorota. 2016. « Categories of Supply Chain Performance Indicators: An Overview of Approaches ». *Business, Management and Education* 14 (1): 103-15.
- Lu, Bin, Jianxin Yang, Winifred Ijomah, Wenjie Wu, et Gabriel Zlamparet. 2018. « Perspectives on reuse of WEEE in China: Lessons from the EU ». *Resources, Conservation and Recycling*, Sustainable Resource

- Management and the Circular Economy, 135 (août): 83-92.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.012>.
- Macleod, Peter, et Pera Knowledge. 2002. « Prime Faraday Technology Watch: A Review of Flexible Circuit Technology and its Applications ».
- Maier, Clive. 2009. « Design Guides for Plastics ». Econology Ltd.
- Maîtriser la conception par l'analyse de la valeur*. 1992. Bte Formation Promotion. Paris.
- Mancini, Lucia, Lorenzo Benini, et Serenella Sala. 2018. « Characterization of Raw Materials Based on Supply Risk Indicators for Europe ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 23 (3): 726-38.
<https://doi.org/10.1007/s11367-016-1137-2>.
- Maranzana, Nicolas. 2009. « Amélioration de la performance en conception par l'apprentissage en réseau de la conception innovante ». Phdthesis, Université de Strasbourg ; INSA de Strasbourg. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00464861/document>.
- Marconi, Marco, Claudio Favi, Michele Germani, Marco Mandolini, et Marco Mengarelli. 2017. « A Collaborative End of Life platform to Favour the Reuse of Electronic Components ». *Procedia CIRP*, The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, 61 (janvier): 166-71.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.169>.
- Maris, Elisabeth, et Daniel Froelich. 2013. « Critical analysis of existing recyclability assessment methods for new products in order to define a reference method ». In *REWAS 2013: Enabling Materials Resource Sustainability - TMS 2013 Annual Meeting and Exhibition*, 202-16. San Antonio, United States: Wiley.
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01206761>.
- Martínez Leal, Jorge, Carole Charbuillet, Stéphane Pompidou, et Nicolas Perry. 2016. « Recycling Chains: A Proposal for an Exhaustive Definition ». In , 21. Rome, Italy.
- Martinez, Maribel, et Deyi Xue. 2016. « Development of Adaptable Products Based on Modular Design and Optimization Methods ». *Procedia CIRP*, 26th CIRP Design Conference, 50 (janvier): 70-75.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.078>.
- Masanet, E., R. Auer, D. Tsuda, T. Barillot, et A. Baynes. 2002. « An assessment and prioritization of "design for recycling" guidelines for plastic components ». In *Conference Record 2002 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment (Cat. No.02CH37273)*, 5-10.
<https://doi.org/10.1109/ISEE.2002.1003229>.
- Mathieux, Fabrice. 2002. « Contribution à l'intégration de la valorisation en fin de vie dès la conception d'un produit . Une méthode basée sur l'évaluation multicritères de la recyclabilité du produit et sur l'identification de ses points faibles de conception ». Phdthesis, Chambéry, France: Arts et Métiers ParisTech. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00005689/document>.
- Mathieux, Fabrice, Daniel Froelich, et Pierre Moszkowicz. 2008. « ReSICLED: a new recovery-conscious design method for complex products based on a multicriteria assessment of the recoverability ». *Journal of Cleaner Production* 16 (3): 277-98. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.07.026>.
- Maudet-Charbuillet, Carole. 2009. « Proposition d'outils et démarches pour l'intégration de filières de recyclage de matières plastiques dans la "supply chain" automobile. » Phdthesis, Arts et Métiers ParisTech. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00005773/document>.
- Maurin, Michel. 2007. « Pour une construction formelle d'indice global agrégé en pollution de l'air ».
- Meadows, Donella H., et Club of Rome, éd. 1972. *The Limits to growth: a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind*. New York: Universe Books.
- Migone, Andrea. 2007. « Hedonistic Consumerism: Patterns of Consumption in Contemporary Capitalism ». *Review of Radical Political Economics* 39 (2): 173-200. <https://doi.org/10.1177/0486613407302482>.
- Ministère de la Transition écologique et solidaire. 2017. « Traitement des déchets ». 15 février 2017. <http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/traitement-des-dechets>.
- . 2019. « Traitement des déchets ». 2019. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/traitement-des-dechets>.
- . s. d. « Gestion des déchets : principes généraux ». Consulté le 21 juin 2019. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/traitement-des-dechets>.

- solidaire.gouv.fr/gestion-des-dechets-principes-generaux.
- Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer. s. d. « L'économie circulaire ». Consulté le 29 juin 2016. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/L-economie-circulaire,45403.html>.
- Ministre de l'aménagement du territoire et de l'environnement. 2000. *Code de l'environnement*. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000006074220>.
- Monier, Véronique, Shailendra Mudgal, Mathieu Hestin, Jérémie Cavé, Manuela Gheoldus, Mike Van Acoleyen, Ilse Laureysens, et al. 2014. « Development of Guidance on Extended Producer Responsibility (EPR) - Final Report ». European Commission – DG Environment.
- Movilla, Natalia Alonso. 2016. « Contribution aux méthodes de conception pour la fin de vie : prise en compte des pratiques de prétraitement de la filière DEEE (Déchets d'Équipements Électriques et Electroniques) ». Phdthesis, Université Grenoble Alpes. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01623569/document>.
- « Multi-Criteria Decision Making - an overview | ScienceDirect Topics ». s. d. Consulté le 9 août 2019. <https://www.sciencedirect.com/topics/mathematics/multi-criteria-decision-making>.
- OCDE. 2017. *La responsabilité élargie du producteur: Une mise à jour des lignes directrices pour une gestion efficace des déchets*. Éditions OCDE. <https://doi.org/10.1787/9789264273542-fr>.
- Office Québécois de la Langue Française. s. d. « « Corrosion » ». Le grand dictionnaire terminologique (GDT). Consulté le 24 août 2019a. http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=17491087.
- . s. d. « « Démontabilité » ». Le grand dictionnaire terminologique (GDT). Consulté le 27 août 2019b. http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=17065703.
- . s. d. « « Inflammabilité » ». Le grand dictionnaire terminologique (GDT). Consulté le 17 août 2019c. http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8354794.
- . s. d. « « Potentiel méthanogène de biomasse » ». Le grand dictionnaire terminologique (GDT). Consulté le 17 août 2019d. http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=26552428.
- . s. d. « « Pouvoir calorifique » ». Le grand dictionnaire terminologique (GDT). Consulté le 17 août 2019e. http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8395436.
- . s. d. « « Toxicité » ». Le grand dictionnaire terminologique (GDT). Consulté le 17 août 2019f. http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8355535.
- . s. d. « « Usure » ». Le grand dictionnaire terminologique (GDT). Consulté le 24 août 2019g. http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8881671.
- Olugu, Ezutah Udony, Kuan Yew Wong, et Awaludin Mohamed Shaharoun. 2011. « Development of key performance measures for the automobile green supply chain ». *Resources, Conservation and Recycling, Environmental Supply Chain Management*, 55 (6): 567-79. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.06.003>.
- Organisation internationale de normalisation. 2015. « ISO 9000:2015. Systèmes de management de la qualité. Principes essentiels et vocabulaire ». Norme ISO 9000:2015.
- Pahl, Gerhard, W. Beitz, Jörg Feldhusen, et Karl-Heinrich Grote. 2007. *Engineering Design: A Systematic Approach*. Springer Science & Business Media.
- Pahl, Gerhard, Wolfgang Beitz, Jörg Feldhusen, Karl-Heinrich Grote, Ken Wallace, et Lucienne T. Blessing, éd. 2007. *Engineering Design: A Systematic Approach*. 3. ed. London: Springer.
- Parlement Européen & Conseil de l'Union Européenne. 2000. *Directive 2000/53/CE relative aux véhicules hors d'usage*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex:32000L0053>.
- . 2005. *Directive 2005/32/CE établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits consommateurs d'énergie*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=URISERV:l32037&from=FR>.
- . 2008. *Directive 2008/98/CE relative aux déchets*. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0098>.
- . 2009. *Directive 2009/125/CE établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière*

- d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie.*
<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000021230678&categorieLien=id>.
- — —. 2011. *Directive 2011/65/UE relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques.* <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A32011L0065>.
- — —. 2012. *Directive 2012/19/UE relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE).* <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0019>.
- Parlement Européen, et Conseil de l'Union Européenne. 1994. *Directive 94/62/CE relative aux emballages et aux déchets d'emballages.*
- — —. 2000. *Directive 2000/53/CE relative aux véhicules hors d'usage.* <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex:32000L0053>.
- — —. 2005. *Directive 2005/64/CE concernant la réception par type des véhicules à moteur au regard des possibilités de leur réutilisation, de leur recyclage et de leur valorisation, et en modifiant la directive 70/156/CEE du Conseil.*
- — —. 2008. *Directive 2008/98/CE relative aux déchets.* <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0098>.
- — —. 2009. *Directive 2009/125/CE établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie.*
- — —. 2011. *Directive 2011/65/UE relative à la limitation de l'utilisation de certaines substances dangereuses dans les équipements électriques et électroniques.* <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=celex%3A32011L0065>.
- — —. 2012. *Directive 2012/19/UE relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE).* <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0019>.
- Pialot, O., et D. Millet. 2014. « Why Upgradability should be Considered for Rationalizing Materials? » *Procedia CIRP*, 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering, 15 (janvier): 379-84. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.013>.
- Pialot, Olivier, Dominique Millet, et Justine Bisiaux. 2017. « "Upgradable PSS": Clarifying a new concept of sustainable consumption/production based on upgradability ». *Journal of Cleaner Production* 141 (janvier): 538-50. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.161>.
- Pinel, Muriel. 2013. « L'introduction de la gestion du cycle de vie produit dans les entreprises de sous-traitance comme vecteur d'agilité opérationnelle et de maîtrise du produit », mai. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00852852>.
- Pôle éco-conception. 2015. « Fascicule de conception pour l'intégration de la pensée fin de vie ». <http://www.eco-conception.fr/articles/nouveau-document--fascicule-de-conception-pour-lintegration-de-la-pensee-fin-de-vie.html>.
- Posch, Maximilian, Jyri Seppälä, Jean-Paul Hettelingh, Matti Johansson, Manuele Margni, et Olivier Jolliet. 2008. « The Role of Atmospheric Dispersion Models and Ecosystem Sensitivity in the Determination of Characterisation Factors for Acidifying and Eutrophying Emissions in LCIA ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13 (6): 477. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0025-9>.
- Président de la République, et Assemblée nationale et Sénat. 1975. *Loi n° 75-633 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux.* https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?jsessionid=C40A6AC125DDEB7D2B068256FC31C306.tp.dila12v_2?cidTexte=JORFTEXT000000888298&dateTexte=20160630.
- — —. 1992. *Loi n° 92-646 relative à l'élimination des déchets ainsi qu'aux installations classées pour la protection de l'environnement.* 92-646. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000345400&categorieLien=id>.
- — —. 2009. *Loi n° 2009-967 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement.* 2009-967. <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000020949548&categorieLien=id>.

- — —. 2010. *Loi n° 2010-788 portant engagement national pour l'environnement. 2010-788.* <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000022470434>.
- Qian, X., Y. Yu, et H. C. Zhang. 2001. « A semi-quantitative methodology of environmentally conscious design for electromechanical products ». In *Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. 2001 IEEE ISEE (Cat. No.01CH37190)*, 156-60. <https://doi.org/10.1109/ISEE.2001.924519>.
- Reck, B. K., et T. E. Graedel. 2012. « Challenges in Metal Recycling ». *Science* 337 (6095): 690-95. <https://doi.org/10.1126/science.1217501>.
- Reuter, M. A., et A. van Schaik. 2015. « Product-Centric Simulation-Based Design for Recycling: Case of LED Lamp Recycling ». *Journal of Sustainable Metallurgy* 1 (1): 4-28. <https://doi.org/10.1007/s40831-014-0006-0>.
- Reuter, M., A. Van Schaik, J. Becker, V. Occhionorelli, R. Balkenende, W. Van Meensel, J. Felix, M. Aerts, S. Sjölin, et J. Huisman. 2014. « Greenelec: Product design linked to recycling ». *Going green - Care innovation 2014, Vienna (Austria), 17-20 Nov. 2014.* <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid:80628915-8322-4f2f-8196-348bfb92c34d?collection=research>.
- Reuter, Markus. 2012. « Challenges of Metal Recycling ». *Materia*, 50.
- Reuter, Markus, Antoinette Schaik, et Miquel Ballester. 2018. « Limits of the Circular Economy: Fairphone Modular Design Pushing the Limits ». *World of Metallurgy - ERZMETALL* 71.
- Rizos, Vasileios, Katja Tuokko, et Arno Behrens. 2017. « The Circular Economy: A review of definitions, processes and impacts ». Ecologic Institute.
- Rogaume, Thomas. 2006. *Gestion des déchets: réglementation, organisation, mise en oeuvre*. Paris: Ellipses.
- Rogers, Dale S., et Ronald S. Tibben-Lembke. 1998. *Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices*. Center for Logistics Management, University of Nevada, Reno: Reverse Logistics Executive Council.
- Rosenbaum, Ralph K., Till M Bachmann, Lois S. Gold, Mark A.J. Huijbregts, Olivier Jolliet, Ronnie Juraske, Annette Köhler, et al. 2008. « USEtox - The UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in Life Cycle Impact Assessment ». *International Journal of Life Cycle Assessment* 13 (7): 532-46. <https://doi.org/10.1007/s11367-008-0038-4>.
- Rosu, Vlad, et Perrine Tilloy. 2013. « Analyse technico-économique et environnementale de filières de recyclage de matériaux pour une aide à la conception de produit orientée fin de vie ». Chambéry, France: Arts et Métiers ParisTech, centre de Paris, Institut de Chambéry.
- Rousseaux, Patrick, Cécile Gremy-Gros, Marie Bonnin, Catherine Henriel-Ricordel, Pierrick Bernard, Léa Flourey, Gwenaëlle Staigre, et Philippe Vincent. 2017. « "Eco-tool-seeker": A new and unique business guide for choosing ecodesign tools ». *Journal of Cleaner Production* 151 (mai): 546-77. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.089>.
- Rui Liu, et Raja R.A. Issa. 2014. « Design for maintenance accessibility using BIM tools ». *Facilities* 32 (3/4): 153-59. <https://doi.org/10.1108/F-09-2011-0078>.
- Rzeźnik, Cz, P. Rybacki, et A. Molińska. 2008. « Assessment of the Effect of the Material Diversity of Agricultural Machines on Their Recyclability ». *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* Vol. 53 (nr 1): 12-15.
- Saidani, Michael. 2018. « Monitoring and Advancing the Circular Economy Transition : Circularity Indicators and Tools Applied to the Heavy Vehicle Industry », octobre. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01933049>.
- Sarkis, Joseph, Qinghua Zhu, et Kee-hung Lai. 2011. « An organizational theoretic review of green supply chain management literature ». *International Journal of Production Economics* 130 (1): 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.11.010>.
- Schaik, A. van, et M. A. Reuter. 2004. « The Optimization of End-of-Life Vehicle Recycling in the European Union ». *JOM* 56 (8): 39-43. <https://doi.org/10.1007/s11837-004-0180-9>.
- Seppälä, Jyri, Maximilian Posch, Matti Johansson, et Jean-Paul Hettelingh. 2006. « Country-Dependent

- Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator (14 Pp) ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 11 (6): 403-16. <https://doi.org/10.1065/lca2005.06.215>.
- Seuring, Stefan, et Martin Müller. 2008. « From a literature review to a conceptual framework for sustainable supply chain management ». *Journal of Cleaner Production, Sustainability and Supply Chain Management*, 16 (15): 1699-1710. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.020>.
- SITA. 2016. « Combustible Solide de Récupération (CSR) ». *SITA* (blog). 2 juillet 2016. <http://www.sita.fr/lexique/combustible-solide-de-recuperation-csr/>.
- Solomon, S., M. Mills, L. E. Heidt, W. H. Pollock, et A. F. Tuck. 1992. « On the Evaluation of Ozone Depletion Potentials ». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 97 (D1): 825-42. <https://doi.org/10.1029/91JD02613>.
- Srivastava, Samir K. 2007. « Green Supply-Chain Management: A State-of-the-Art Literature Review ». *International Journal of Management Reviews* 9 (1): 53-80. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x>.
- Stapelberg, Rudolph Frederick. 2009. « Reliability and Performance in Engineering Design », 43-294. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-175-6_3.
- Struijs, J., A. Beusen, H. van Jaarsveld, et M. A. J. Huijbregts. 2009. « Aquatic eutrophication ». *ReCiPe 2008– A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level*.
- Szałatkiewicz, Jakub. 2014. « Metals Content in Printed Circuit Board Waste ». *Polish Journal of Environmental Studies* 23 (6): 2365-69.
- Szargut, Jan. 2005. *Exergy Method: Technical and Ecological Applications*. WIT Press.
- Tchertchian, Nicolas, Dominique Millet, et Akram El Korchi. 2012. « Design for Remanufacturing: What Performances Can Be Expected? » *International Journal of Environmental Technology and Management* 15 (1): 28-49. <https://doi.org/10.1504/IJETM.2012.045151>.
- Tchertchian, Nicolas, Dominique Millet, et Olivier Pialot. 2011. « Modular Grouping Exploration to Design Remanufacturable Products ». In *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing*, 413-18. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19692-8_71.
- Telenko, Cassandra, Carolyn C. Seepersad, et Michael E. Webber. 2008. « A Compilation of Design for Environment Principles and Guidelines », janvier, 289-301. <https://doi.org/10.1115/DETC2008-49651>.
- Thakkar, Jitesh, Arun Kanda, et S.G. Deshmukh. 2009. « Supply chain performance measurement framework for small and medium scale enterprises ». *Benchmarking: An International Journal* 16 (5): 702-23. <https://doi.org/10.1108/14635770910987878>.
- TLFi. s. d. « Artéfact ». In *Le Trésor de la Langue Française informatisé*. Consulté le 26 juin 2016a. <http://atilf.atilf.fr/dendien/scripts/tlfiv5/advanced.exe?8;s=2556907185;>
- . s. d. « Capitalisme ». *Le Trésor de la Langue Française informatisé*. Consulté le 10 août 2019b. <http://stella.atilf.fr/Dendien/scripts/tlfiv5/visusel.exe?12;s=3075002415;r=1;nat=;sol=3;>
- . s. d. « Image de marque ». In *Le Trésor de la Langue Française informatisé*. Consulté le 26 juin 2016c. <http://atilf.atilf.fr/dendien/scripts/tlfiv5/search.exe?23;s=1604341425;cat=1;m=image+de+marque;>
- . s. d. « Matériau ». In *Le Trésor de la Langue Française informatisé*. Consulté le 2 juillet 2016d. <http://atilf.atilf.fr/dendien/scripts/tlfiv5/advanced.exe?8;s=768773490;>
- . s. d. « Matière ». In *Le Trésor de la Langue Française informatisé*. Consulté le 2 juillet 2016e. <http://atilf.atilf.fr/dendien/scripts/tlfiv5/advanced.exe?8;s=768773490;>
- Ulrich, Karl, et Steven Eppinger. 2011. *Product Design and Development*. 5^e éd. New York: McGraw-Hill Higher Education.
- Umeda, Yasushi, Shinichi Fukushige, Takahiro Mizuno, et Yuki Matsuyama. 2013. « Generating design alternatives for increasing recyclability of products ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62 (1): 135-38. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.060>.

- Umeda, Yasushi, Shinichi Fukushige, et Keita Tonoike. 2009. « Evaluation of scenario-based modularization for lifecycle design ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58 (1): 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.083>.
- Umeda, Yasushi, Shinichi Fukushige, Keita Tonoike, et Shinsuke Kondoh. 2008. « Product modularity for life cycle design ». *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57 (1): 13-16. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.115>.
- UNEP. 2016. « Global Guidance for Life Cycle Impact Assessment Indicators Volume 1 ». <https://www.lifecycleinitiative.org/training-resources/global-guidance-lcia-indicators-v-1/>.
- UNEP, et SETAC. 2017. « Hotspots Analysis: An overarching methodological framework and guidance for product and sector level application ».
- University of Alberta. s. d. « What is sustainability? »
- UQAR. s. d. « Guide méthodologique de développement de produit ». Guide d'aides à la conception. Consulté le 11 mars 2019. <http://guidesaideconception.uqar.ca/guide-methodologique/>.
- Valette-Florence, Pierre. 1988. « Spécificités des apports des méthodes d'analyse multivariée de la deuxième génération ». *Recherche et Applications en Marketing* 3 (4).
- Van Nieuwenhuyse, Thomas, Pierre-Marie Assimon, et Alice Bizouard. 2016. « REEECYC'LAB: Assessing and Improving the Recyclability of Electrical and Electronic Equipments ». In , 230-31. Lille, France: cd2e.
- Van Nieuwenhuyse, Thomas, et Romain Lesage. 2016. « Eco-Design for Recycling: Developing Life-Cycle Inventories on the End-of-Life of Electr(on)ic Devices ». In , 228-29. Lille, France: cd2e.
- Van Oers, L., A. De Koning, Jeroen B. Guinée, et G. Huppes. 2002. « Abiotic resource depletion in LCA ». *Road and Hydraulic Engineering Institute, Ministry of Transport and Water, Amsterdam*.
- Van Oers, Lauran, et Jeroen Guinée. 2016. « The Abiotic Depletion Potential: Background, Updates, and Future ». *Resources* 5 (1): 16. <https://doi.org/10.3390/resources5010016>.
- Vanegas, Paul, Jef R. Peeters, Dirk Cattrysse, Paolo Tecchio, Fulvio Ardente, Fabrice Mathieux, Wim Dewulf, et Joost R. Dufloy. 2018. « Ease of disassembly of products to support circular economy strategies ». *Resources, Conservation and Recycling, Sustainable Resource Management and the Circular Economy*, 135 (août): 323-34. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.06.022>.
- Vercalsteren, An, Maarten Christis, et Veronique Van Hoof. 2018. « Indicators for a Circular Economy ». SUMMA.
- Vezzoli, Carlo, et Ezio Manzini. 2008. *Design for Environmental Sustainability*. London: Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-163-3>.
- Villalba, G, M Segarra, A. I Fernández, J. M Chimenos, et F Espiell. 2002. « A proposal for quantifying the recyclability of materials ». *Resources, Conservation and Recycling* 37 (1): 39-53. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00056-3).
- Wais, Hibo Said Chekh, Peter Mitrouchev, et Michel Tollenaere. 2014. « Disassembly Sequencing for End-of-Life Products ». In . <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00983561>.
- Wimmer, Wolfgang, et Rainer Züst. 2001. *ECODESIGN Pilot: Product Investigation, Learning and Optimization Tool for Sustainable Product Development with CD-ROM*. Alliance for Global Sustainability Bookseries. Springer Netherlands. [//www.springer.com/de/book/9781402009655](http://www.springer.com/de/book/9781402009655).
- World Meteorological Organization, éd. 1999. *Scientific assessment of ozone depletion, 1998*. Report / World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project, no. 44. Washington, DC : Nairobi, Kenya : Geneva, Switzerland : Brussels, Belgium: National Oceanic and Atmospheric Administration : National Aeronautics and Space Administration ; United Nations Environment Programme ; World Meteorological Organization ; European Commission.
- . 2015. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014. Pursuant to Article 6 of the Montreal Protocol on Substances That Deplete the Ozone Layer*. Scientific Assessment of Ozone Depletion 2014. Geneva: World Meteorological Organization.
- Yang, Qz, et B Song. 2006. « Eco-Design for Product Lifecycle Sustainability ». In *2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 548-53. Singapore: IEEE.

- <https://doi.org/10.1109/INDIN.2006.275615>.
- Yang, S. S., S. K. Ong, et A. Y. C. Nee. 2016. « A Decision Support Tool for Product Design for Remanufacturing ». *Procedia CIRP*, 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Decoupling Growth from Resource Use, 40 (janvier): 144-49. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.085>.
- Zelm, Rosalie van, Mark A. J. Huijbregts, Henri A. den Hollander, Hans A. van Jaarsveld, Ferd J. Sauter, Jaap Struijs, Harm J. van Wijnen, et Dik van de Meent. 2008. « European characterization factors for human health damage of PM10 and ozone in life cycle impact assessment ». *Atmospheric Environment* 42 (3): 441-53. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.072>.
- Zeng, Xianlai, et Jinhui Li. 2016. « Measuring the recyclability of e-waste: an innovative method and its implications ». *Journal of Cleaner Production* 131 (septembre): 156-62. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.055>.
- Zhang, Jian, Deyi Xue, et Peihua Gu. 2015. « An Integrated Framework to Design Architecture, Configurations and Parameters of Adaptable Product with Robust Performance ». *Procedia CIRP*, CIRP 25th Design Conference Innovative Product Creation, 36 (janvier): 147-52. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.01.077>.
- Zhang, Tongzhu, Xueping Wang, Jiangwei Chu, et Pengfei Cui. 2010. « Remanufacturing mode and its reliability for the design of automotive products », janvier, 25-31. <https://doi.org/10.1049/cp.2010.0408>.
- Zwolinski, Peggy, et Daniel Brissaud. 2008. « Remanufacturing strategies to support product design and redesign ». *Journal of Engineering Design* 19 (4): 321-35. <https://doi.org/10.1080/09544820701435799>.

Publications et communications scientifiques

Publication dans une revue internationale à comité de lecture

Horta Arduin, Rachel, Guilhem Grimaud, **Jorge Martínez Leal**, Stéphane Pompidou, Carole Charbuillet, Bertrand Laratte, Thecle Alix, et Nicolas Perry. 2019. « Influence of scope definition in recycling rate calculation for European e-waste extended producer responsibility ». *Waste Management* 84 (février): 256-68. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.002>.

Publications dans un ouvrage national à comité de lecture

Martínez Leal, Jorge, Stéphane Pompidou, Carole Charbuillet, et Nicolas Perry. 2019. « Efficacité potentielle de valorisation (Proposition d'indicateurs à l'usage du concepteur pour mieux prendre en compte l'efficacité des voies de traitement du produit en fin de vie) ». In *Les enjeux d'écoconception en économie circulaire*, Presse des Mines.

Pialot, Olivier, **Jorge Martínez Leal**, Stéphane Le Pochat, Dominique Millet, Stéphane Pompidou, et Nicolas Perry. 2019. « Conception conjointe produit/filière (Méthodologie de conception conjointe du produit et de sa filière de traitement en fin de vie intégrant l'effectivité de ses processus ou visant à en améliorer l'efficacité) ». In *Les enjeux d'écoconception en économie circulaire*, Presse des Mines.

Exposés oraux dans des conférences internationales avec actes expertisés

Leal, J. Martínez, S. Pompidou, C. Charbuillet, et N. Perry. 2018. « Product Recoverability: A Review of Assessment Methods ». *Procedia CIRP*, 25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference, 30 April – 2 May 2018, Copenhagen, Denmark, 69: 710-15. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.061>.

Horta Arduin, Rachel, **Jorge Martínez Leal**, Guilhem Grimaud, Carole Charbuillet, Stéphane Pompidou, Bertrand Laratte, et Nicolas Perry. 2017. « Scope Definition on End-of-Life Chain Performance Assessment:

Références bibliographiques

Recycling Rate and French E-Waste Chain Case Study ». Tainan, Taiwan.

Martínez Leal, Jorge, Stéphane Pompidou, Carole Charbuillet, et Nicolas Perry. 2016. « Integración de un factor de desempeño de las cadenas de reciclaje en el cálculo de las tasas de reciclabilidad y valorizabilidad de productos. Aplicación a la cadena de reciclaje de vehículos francesa ». 11p. Bogotá, Colombia.

Martínez Leal, Jorge, Carole Charbuillet, Stéphane Pompidou, et Nicolas Perry. 2016. « Recycling Chains: A Proposal for an Exhaustive Definition ». 21p. Rome, Italy.

Exposé oral dans une conférence nationale

Pompidou, Stéphane (présentateur), Olivier Pialot, **Jorge Martínez Leal**, Stéphane Le Pochat, Dominique Millet et Nicolas Perry (collaborateurs). « Conception conjointe produit/filière ». Atelier Thématique Annuel EcoSD 2018, 3 octobre 2018, Châtillon, France.

Rapport scientifique

Pialot, Olivier, Dominique Millet, Stéphane Le Pochat, et **Jorge Martínez Leal**. 2016. « Méthodologie de conception conjointe “produit” et “filière” de fin de vie (PRC 14.4) ».

DÉVELOPPEMENT D'OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION EN CONCEPTION PILOTÉS PAR L'ANALYSE MULTICRITÈRE DE LA VALORISABILITÉ DU PRODUIT ET L'OUTILLAGE DES LIGNES DIRECTRICES D'ÉCOCONCEPTION POUR LA FIN DE VIE

RÉSUMÉ Les réglementations incitent aujourd'hui concepteurs et fabricants à s'engager dans des démarches d'économie circulaire et d'écoconception pour atténuer l'impact de leurs produits sur l'environnement. Les choix de conception sont à ce jour essentiellement pilotés par l'évaluation de la valorisabilité du produit. Les lignes directrices associées aux démarches de conception pour *X* sont utilisées ensuite comme outil d'aide à la décision pour la recherche de solutions.

Un lien entre la valorisabilité évaluée dès lors et les lignes directrices d'écoconception doit donc être établi pour que le concepteur puisse mieux interpréter les informations auxquelles il est confronté, et simplifier d'autant son processus de conception. Un inventaire de ces guides couplé à une démarche d'écoconception pour la fin de vie permet alors d'identifier différents leviers d'action. Cependant, il n'existe qu'une faible adéquation entre les indicateurs de valorisabilité et les leviers associés aux lignes directrices. Ce travail vise ainsi à proposer une méthodologie outillée d'aide à la décision en conception, basée sur l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit et complétée par un guide outillé s'appuyant sur diverses lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie.

L'approche proposée est validée par l'étude de l'intégration d'un Fairphone® dans la filière des DEEE.

Mots clés Écoconception, conception pour la fin de vie, analyse multicritère, outils d'aide à la décision

DEVELOPMENT OF DESIGN DECISION SUPPORT TOOLS BASED ON THE MULTI-CRITERIA ANALYSIS OF PRODUCT RECOVERABILITY AND INDICATOR-BASED ECODESIGN FOR END-OF-LIFE GUIDELINES

ABSTRACT Current regulations encourage designers and manufacturers to engage in circular economy and eco-design approaches in order to mitigate the environmental impact of their products. Today, design choices are mainly driven by product recoverability assessment. Guidelines associated with design for *X* approaches are then used as a decision-making tool for finding solutions.

It is therefore necessary to establish a link between the assessed recoverability and eco-design guidelines so that designers can better interpret the information they are given and simplify their design process accordingly. An inventory of these guidelines combined with an eco-design for an end-of-life approach makes it possible to identify the associated levers for action. However, there is only minimal correlation between recoverability indicators and the levers associated with the guidelines. Therefore, this proposal aims to build an indicator-based decision-making design methodology based on a multi-criteria analysis of the product's recoverability. It is enhanced by a tooled guide based on eco-design for end-of-life guidelines.

The proposed approach has been validated through the study of a Fairphone® included in the WEEE recycling chain.

Keywords Eco-design, design for end-of-life, multi-criteria analysis, decision support tools

