

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

**Outil d'aide à la conception de produits modulaires en vue de leur fin de vie**

**DAPHNÉ LABRECQUE NADEAU**

Département de génie mécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

Génie mécanique

Août 2020

© Daphné Labrecque Nadeau, 2020.

# **POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Outil d'aide à la conception de produits modulaires en vue de leur fin de vie**

présenté par **Daphné LABRECQUE NADEAU**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

**Aurelian VADEAN**, président

**Sofiane ACHICHE**, membre et directeur de recherche

**Daniel SPOONER**, membre

## DÉDICACE

*À ma grand-mère Madeleine Laberge, centenaire, un modèle à suivre.*

## REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier mon directeur de recherche, Professeur Sofiane Achiche, pour sa patience et son dévouement ces derniers mois, me permettant de terminer ma maîtrise. Je voudrais aussi remercier feu Professeur Christian Mascle pour m'avoir fait découvrir le monde de la conception de produits et le monde de la recherche. Je remercie aussi Monsieur Olivier Kerbrat, Maître de conférences à l'ENS Rennes et Professeur invité à Polytechnique Montréal, pour son aide et son apport à mon travail de recherche. Merci à Angela, Claudia et Othmane qui m'ont vu évoluer dans ce projet et qui m'ont soutenu dans toutes les étapes. Merci aussi à mes collègues du Laboratoire de Conception de Systèmes Intelligents et Mécatroniques (CoSIM) qui m'ont très bien accueilli parmi eux.

Je voudrais exprimer ma reconnaissance envers les personnes à Polytechnique Montréal sans qui mes années de maîtrise auraient été bien différentes; le CIPO, l'équipe d'enseignement des cours MEC15150 et MEC1515, les employés du service du recrutement, les membres de l'AECSP ainsi que toutes les personnes qui ont croisé mon chemin entre les murs de cette institution.

Merci à ma sœur Malou, ma mère Nicole et mon frère Xavier pour leur support et leur patience à travers les péripéties. Je tiens aussi à remercier Laure, Florence, Imane et Catherine qui m'ont suivi tout au long de cette aventure.

Finalement, un immense merci à ma famille et à mes amis qui m'ont encouragé et soutenu durant ces dernières années en me donnant l'énergie et la motivation pour continuer à avancer.

## RÉSUMÉ

Les industries sont en constante recherche de procédés plus efficaces pour fabriquer les produits qu'ils mettent en marché. Ces décisions sont souvent basées sur des choix économiques, mais d'autres facteurs peuvent être considérés lors de l'élaboration de la stratégie de conception. La fin de vie des déchets d'équipement électronique et électrique est sujette à un intérêt particulier, mis en lumière par les politiques de responsabilité des producteurs à l'échelle du Québec et du Canada (Canada, 2014). L'intérêt pour la fin de vie des produits dès les premières étapes de leur conception est donc un sujet pertinent à aborder. Le but des méthodes de conception en vue de la fin de vie est bien sûr de mieux évaluer les possibilités de réutilisation, refabrication et recyclage des produits afin de conserver les précieux matériaux dans la boucle de l'économie circulaire et réduire les déchets.

Les méthodes de conception existantes pour les produits modulaires ne sont pas adaptées à des produits complexes et ne considèrent pas la fin de vie dans les paramètres de conception (Holmqvist et Persson, 2003). Voici pourquoi le développement d'un outil d'aide à la conception tenant compte de tous ces aspects était pertinent.

L'Outil d'aide à la Conception Modulaire pour la Fin de Vie (OCMFDV) développé dans ce travail de maîtrise s'intègre dans le processus de conception partant des fonctions d'un produit pour aboutir à une recommandation de scénario de fin de vie pour l'ensemble de celui-ci. L'utilisation de cet outil nécessite que l'association fonction-module ait déjà été effectuée pour le produit en question. Les différents modules identifiés sont donc le point de départ de l'outil. Par la suite, une évaluation de chacun des modules pour les quatre fins de vie proposée est effectuée pour obtenir un score pour chacune des combinaisons. Ce sera le scénario de fin de vie présentant le moins grand impact environnemental qui sera sélectionné comme proposition de fin de vie. C'est donc cette association module-fin de vie qui est recherchée. Les considérations prises en compte sont principalement environnementales, donc les coûts associés aux opérations de traitement n'ont pas été inclus dans la proposition. Cela aurait sûrement affecté les recommandations proposées, puisque, par exemple, les coûts importants reliés à la main d'œuvre et aux outils pour le désassemblage des produits en fin de vie pourraient grandement influencer sur les décisions des entreprises, préférant opter pour des opérations moins coûteuses; comme le recyclage.

Une fois l'outil établi et les critères déterminés, l'évaluation de produits de types et de natures différentes a été effectuée pour vérifier si l'OCMFDV proposait des résultats cohérents avec les recommandations issues de la littérature. Une comparaison des résultats pour les produits étudiés présentant des similitudes a été effectuée, en plus d'une application de l'outil sur un objet dont les données étaient issues de la littérature; une télévision, comparant les recommandations des études existantes avec les résultats obtenus. Les études proposaient principalement que l'ensemble du produit soit recyclé en fin de vie, principalement sans désassemblage. En appliquant l'OCMFDV, la réutilisation, la refabrication et le recyclage sans désassemblage sont les trois scénarios proposés pour les modules du produit. Bien que ces résultats soient cohérents avec les hypothèses de la littérature, une généralisation de l'application de l'outil proposé n'a cependant pas pu être effectuée puisque l'étude d'un plus grand nombre de produits serait nécessaire pour en tirer des conclusions pour l'ensemble des produits modulaires.

De futurs travaux de recherche porteraient sur le développement de l'entièreté de la méthode de conception; effectuer l'association fonction – module, déterminer la fin de vie pour chaque module, puis déterminer la fin de vie recommandée pour le produit en entier. Des méthodes de conceptions de produits modulaires ont été développées dans la littérature, permettant de guider les concepteurs dans leurs démarches; il resterait à en identifier une qui pourrait être appliquée dans ce contexte et qui pourrait être utilisée efficacement avec l'outil proposé. De plus, un intérêt particulier pourrait être accordé à l'importance de la traçabilité de l'information de la conception à la fin de vie pour traiter les composants d'un produit de la bonne façon, à la suite de leur vie utile.

## ABSTRACT

Industries are constantly looking for more efficient processes to manufacture their products. The decisions are often based on economic premises, but other factors are worth considering when developing the design strategy. The end-of-life of waste electronic and electrical equipment is of interest, highlighted by producer responsibility policies across Quebec and Canada (Canada, 2014). Interest in the end-of-life of products from the early stages of their design is therefore a relevant topic to address. The goal of design for end-of-life methods is, of course, to better evaluate the possibilities of reusing, remanufacturing, and recycling products to keep valuable materials in the loop of the circular economy and reduce waste.

Existing modular product design methods are not well suited for complex products and do not consider end-of-life in their design parameters (Holmqvist et Persson, 2003). Therefore, developing a new method that takes all these aspects into account was relevant.

The proposed Modular Design for End-of-Life design tool (OCMFDV) can be integrated into the design process, starting with the functions of a product, and leading to a recommendation of an end-of-life scenario for the whole product. The method developed in this master's thesis requires the function-module association to be already established for the product in question. The different modules of the product are therefore the starting point of the method. After that, an evaluation of each of the modules for the four proposed End of Lifes (EOL) is performed to establish the score for each module. The end-of-life scenario with the lowest environmental impact will be selected. The objective is therefore this end-of-life to module association. The considerations taken into account are mainly environmental, therefore the costs associated with the treatment operations have not been included in the method. This would certainly have affected the proposed recommendations, since, for example, the significant costs related to labour and tools for disassembly of end-of-life products could greatly influence companies' decisions to opt for less costly operations, such as recycling.

Once the method established and the criteria determined, the evaluation of products of different types and families was carried out to verify whether the OCMFDV proposed results coherent with the recommendations from the literature. A comparison of results on similar products studies was carried to evaluate the tool. Also, an application of the method was carried out on a television set, comparing the recommendations of existing studies with the results obtained. The studies mainly

proposed that the entire product be recycled at its end-of-life, mainly without disassembly. The results issued from applying the OCMFDV method were that reuse, remanufacturing and recycling without disassembly were the three scenarios suggested for the product modules. Although these results are consistent with the hypothesis in the literature, it was not possible to generalize the proposed method since a study of a larger number of products would therefore be necessary to draw conclusions for a larger number of complex modular products.

Future research should focus on the development of the entire design methodology; associate a function to a module, determine the end-of-life for each module, and then determine the recommended end-of-life for the entire product. Modular product design methods have been developed in the literature to guide designers in their approach; one that could be applied in this context and that could be used effectively with the proposed tool has yet to be identified. In addition, interest could be given to the importance of traceability of information from design to end-of-life to treat the components of a product as it was designed to, following their lifespan.

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS .....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT .....	VII
TABLE DES MATIÈRES .....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
LISTE DES FIGURES .....	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	XVI
LISTE DES ANNEXES .....	XVII
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Définitions .....	2
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE .....	3
2.1 Généralités de conception d'un produit .....	3
2.2 Facteurs influençant la conception .....	4
2.2.1 Impacts de l'environnement sur la conception.....	4
2.3 Choix de conception.....	6
2.3.1 Conceptions en vue de la fin de vie.....	6
2.3.2 Conception fonctionnelle de produits .....	10
2.4 Conception modulaire .....	12
2.4.1 Critères de conception modulaire.....	12
2.4.2 Types de modules.....	12
2.4.3 Types de modularité.....	13
2.4.4 Attachements.....	13

2.4.5	Avantages de la conception modulaire.....	15
2.4.6	Limites de la conception modulaire .....	17
2.5	Méthodes de conception de produits modulaires .....	17
2.5.1	Méthodes basées sur les fonctions .....	18
2.5.2	Méthodes matricielles .....	19
2.6	Économie circulaire.....	21
2.6.1	Présentation de l'économie circulaire .....	21
2.6.2	Principes de l'économie circulaire .....	21
2.6.3	Conception de produits mécatroniques dans un contexte d'économie circulaire .....	22
CHAPITRE 3 JUSTIFICATION DU PROJET .....		23
3.1	Mise en contexte.....	23
3.2	Problématique.....	23
3.3	Objectif principal et objectifs spécifiques .....	24
3.4	Méthodologie .....	24
3.5	Portée du projet .....	25
CHAPITRE 4 MÉTHODE DE CONCEPTION DE PRODUITS MODULAIRES EN VUE DE LEUR FIN DE VIE .....		26
4.1	Situation de la méthode dans le processus de conception de produits .....	26
4.1.1	Outil de conception pour la fin de vie .....	26
4.1.2	Aperçu du processus de conception .....	26
4.1.3	Processus centraux de la méthode développée : l'outil de conception .....	30
4.1.4	Étapes préliminaires .....	31
4.2	Développement de l'outil OCMFDV .....	32
4.2.1	Sélection du mode de fonctionnement .....	32
4.2.2	Critères de conception existants pour ELDA .....	33

4.2.3	Analyse des critères du modèle ELDA .....	35
4.2.4	Sélection des critères en fonction des scénarios de fin de vie.....	38
4.2.5	Mode d'évaluation des critères, pondération et présentation de l'outil .....	41
4.2.6	Représentation des résultats .....	42
4.3	Application de l'outil OCMFDV .....	43
4.3.1	Choix des produits étudiés .....	43
4.3.2	Étapes préliminaires .....	45
4.3.3	Matériel nécessaire .....	46
4.3.4	Test de l'outil par un exemple connu (imprimante).....	46
4.3.5	Présentation et analyse des résultats obtenus pour les 9 produits .....	48
4.4	Comparaison avec la décomposition du produit par modélisation fonctionnelle .....	52
CHAPITRE 5 ÉTUDE DE CAS.....		55
5.1	Présentation de l'étude .....	55
5.2	Données.....	55
5.3	Hypothèses .....	56
5.4	Présentation et analyse des résultats.....	57
CHAPITRE 6 DISCUSSION .....		59
6.1	Discussion sur l'outil proposée .....	59
6.2	Retour sur les hypothèses simplificatrices .....	59
6.3	Propositions de futurs travaux.....	60
6.3.1	Former un bassin d'évaluateurs.....	60
6.3.2	Compléter la méthode de conception .....	61
6.3.3	Assurer la traçabilité de l'information .....	61
6.3.4	Évaluer le marché et la demande des matières récupérées.....	62

CHAPITRE 7 CONCLUSION .....	63
RÉFÉRENCES .....	64
RÉFÉRENCES DES FIGURES.....	70
ANNEXES .....	71

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau A.1 Liste des métaux précieux et symboles chimiques.....	74
Tableau A.2 Liste des matériaux semi-précieux et symboles chimiques.....	74
Tableau A.3 Valeur des métaux contenus dans un circuit électronique d'ordinateur portable .....	74
Tableau B.1 Certains matériaux toxiques pour la santé humaine dans les composants électriques .....	75
Tableau C.1 Critères d'évaluation des scénarios de fin de vie (1/2) .....	76
Tableau C.2 Critères d'évaluation des scénarios de fin de vie (2/2) .....	76
Tableau D.1 Séparation des produits étudiés en modules (1/2) .....	78
Tableau D.2 Séparation des produits étudiés en modules (2/2) .....	78
Tableau F.1 Résultats de l'OCMFDV pour 9 produits .....	89
Tableau F.2 Résultats graphiques des résultats de l'OCMFDV pour 9 produits .....	90
Tableau G.1 Résultats de l'OCMFDV selon la décomposition en systèmes .....	91
Tableau G.2 Résultats graphiques de l'OCMFDV selon la décomposition en systèmes .....	92
Tableau H.1 Caractéristiques de la télévision .....	93
Tableau H.2 Association fonctions modules pour la télévision LCD .....	95

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Décomposition des flux d'un produit (Hubka, 1988).....	10
Figure 2.2 Modèle de Stone et Wood (Stone et Wood, 1999) .....	19
Figure 4.1 Méthode globale de conception .....	28
Figure 4.2 Processus de l'Outil d'aide à la Conception Modulaire pour la Fin De Vie, extrait de la Figure 4.1 .....	30
Figure 4.3 Mise en pratique de l'outil. ....	43
Figure 4.4 Exemple de graphiques représentant les résultats.....	43
Figure 4.5 Exemple de séparation en modules.....	46
Figure 4.6 Hypothèse de scénario de fin de vie pour l'imprimante.....	47
Figure 4.7 Validation des hypothèses pour l'imprimante .....	48
Figure 4.8 Résultats compilés par module de tous les produits étudiés, en conservant tous les scores les plus élevés.....	49
Figure 4.9 Résultats compilés par module, une recommandation par produit.....	50
Figure 4.10 Comparaison petits appareils de cuisine .....	50
Figure 4.11 Comparaison de deux générations d'aspirateurs .....	51
Figure 4.12 Objets qui se déplacent .....	51
Figure 4.13 Association des fonctions aux systèmes de la modélisation fonctionnelle.....	52
Figure 4.14 Résultat combinés du modèle proposé.....	53
Figure 4.15 Résultats pour la décomposition en systèmes.....	53
Figure 5.1 Résultats de l'étude de cas de la télévision LCD.....	53
Figure E.1 Imprimante .....	80
Figure E.2 Imprimante vue éclatée .....	80
Figure E.3 Cafetière .....	81

Figure E.4 Cafetière vue éclatée .....	81
Figure E.5 Presse agrumes automatisé .....	82
Figure E.6 Presse agrumes automatisé vue éclatée .....	82
Figure E.7 Tondeuse à essence .....	83
Figure E.8 Tondeuse à essence vue éclatée.....	83
Figure E.9 Aspirateur standard.....	84
Figure E.10 Aspirateur standard vue éclatée.....	84
Figure E.11 Aspirateur automatisé.....	85
Figure E.12 Aspirateur automatisé vue éclatée .....	80
Figure E.13 Lecteur CD portatif .....	86
Figure E.14 Lecteur CD portatif vue éclatée.....	86
Figure E.15 Voiture téléguidée .....	87
Figure E.16 Voiture téléguidée vue éclatée .....	87
Figure E.17 Bicyclette électrique .....	88
Figure E.18 Bicyclette électrique vue éclatée .....	88
Figure H.1 Télévision.....	93
Figure H.2 Télévision vue éclatée.....	93

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

ACV	Analyse du Cycle de Vie
OCMFDV	Outil d'aide à la Conception Modulaire pour la Fin De Vie
ELDA	End-of-Life Design Advisor
EOL	End of Life
FDV	Fin De Vie
LCD	Liquid Crystal Display
RD	Recyclage avec Désassemblage
RE	Réutilisation
RF	Refabrication
RS	Recyclage Sans désassemblage
SIPOC	Supplier Input Process Output Customer

## LISTE DES ANNEXES

Annexe A - Liste de certains matériaux de grande valeur .....	74
Annexe B – Certains matériaux toxiques dans les composants de produits .....	75
Annexe C - Critères d'évaluation des scénarios de fin de vie.....	76
Annexe D - Séparation des produits étudiés en modules .....	78
Annexe E - Description des produits étudiés .....	80
Annexe F – Résultats de l'OCMFDV pour 9 produits.....	89
Annexe G – Résultats de l'OMFDV selon la décomposition en systèmes .....	91
Annexe H – Données de l'étude de cas.....	93

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La dégradation de l'environnement causée par les activités humaines est un problème préoccupant dans l'actualité mondiale. La pollution causée par les industries représente une part importante des impacts négatifs sur la santé de notre planète. Une des causes principales de cela est la surconsommation de masse qui fait en sorte qu'il est souvent plus intéressant de remplacer un produit en entier que de penser à le réparer. Les consommateurs s'en débarrassent donc et plusieurs de ces produits ne sont pas triés de manière appropriée en fin de vie, menant souvent à la mise en décharge de matériaux qui auraient pu être remis dans la boucle d'utilisation.

Pour tenter de remédier à ce problème, les gouvernements canadiens et québécois ont mis en place une législation afin de mieux contrôler la quantité de déchets éliminés soit par incinération ou mis en décharge. Au niveau du Canada, on retrouve la Loi canadienne sur la protection de l'environnement qui interdit de rejeter des substances toxiques (Canada, 1999). Pour le Québec, le chapitre Q-2 de la Loi sur la qualité de l'environnement, intitulé : Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles (Quebec, 2020), donne le cadre pour la gestion de ce type de résidus.

Des pratiques durables sont donc à intégrer dans les modèles d'affaires des entreprises. Le développement durable étant défini par le rapport Brundtland comme étant : « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs » (World Commission on Environment and Development., 1987). Actuellement, les pratiques permettant d'augmenter la productivité de réduire les coûts sont au cœur des modèles d'affaires classiques, mettant l'accent sur la production de produits. La phase de fin de vie est souvent négligée durant leur conception, d'autant plus que les coûts sur l'environnement ne sont pas souvent facilement identifiables. C'est une façon que les entreprises ont de se déresponsabiliser des impacts possibles de leurs produits sur l'environnement. Responsabiliser autant les fabricants que les consommateurs est aussi un des objectifs du gouvernement du Québec dans sa politique québécoise de gestion des matières résiduelles (Québec, 2018).

Une réponse à ce problème fut l'intégration des scénarios de fin de vie dès les premières phases de conception de produits. Plusieurs options de fin de vie existent déjà; prévoir le traitement à privilégier dès la conception devient un grand avantage et va permettre une meilleure conservation des produits et des matériaux dans la boucle d'utilisation (Sauvé, Normandin et McDonald, 2016).

## 1.1 Définitions

Les domaines de la conception de produits, la conception modulaire et la fin de vie comptent plusieurs termes qui sont définis différemment en fonction du domaine d'application ainsi que des recherches associées. Voici les définitions retenues pour le travail. Celles-ci sont des traductions libres basées sur des articles de littérature et des notions regroupées pour faciliter la compréhension.

**Architecture intégrée :** Structure de produit pour réduire le nombre de pièces, la taille et souvent le coût du produit final. Chaque sous-assemblage pourra effectuer plusieurs fonctions.

**Complexité d'un élément :** Dépend de la taille et du nombre de pièces de l'élément en question, que ce soit un produit ou un module. Les différentes variations et combinaisons de pièces et de modules peuvent le rendre plus complexe (Holmqvist et Persson, 2003).

**Décomposition fonctionnelle :** Action de décomposer la ou les fonction(s) principale(s) du produit en sous-fonctions afin d'atteindre le niveau de résolution attendu.

**Fonction et sous-fonction :** Description d'une opération effectuée par un produit. Les sous-fonctions découlent d'une fonction et permet de mieux décrire les fonctionnalités du produit en question. Elles sont reliées par des flux circulant à travers le produit, de différentes natures : énergie, matière ou d'information.

**Modularité :** Fait de diviser un produit en composants semi-indépendants, chacune permettant de répondre à une fonction précise ou à une combinaison de fonctions. Ces parties seront conçues séparément, mais fonctionneront comme un ensemble cohérent (Baldwin et Clark, 1997).

**Module :** Sous-ensemble dont les interactions entre ces composants sont favorisées et celles avec les composants extérieurs minimisés. La modularité totale étant qu'un module réponde à une fonction unique (Ulrich, 1994).

**Produit complexe :** Produit composé de plusieurs composants et de différents matériaux. Ces produits comportent plus d'un type de systèmes; mécanique, électrique ou électroniques par exemple.

**Résolution :** Niveau de décomposition d'un module en composants indépendants.

**Sous-assemblage :** Groupe de pièces semi-indépendant formé par au moins 2 éléments de nature différente reliés entre eux par des attachements.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

### 2.1 Généralités de conception d'un produit

Certains principes guident la conception et le design de produits mécaniques, pour permettre une conception optimale. Ils sont principalement proposés pour la conception pour l'assemblage et le désassemblage, mais se rapportent aux autres types de conception (Bhander, Hauschild et McAloone, 2003) et à plusieurs phases du cycle de vie du produit. L'idée principale derrière ces principes étant de mettre sur le marché des produits qui pourront être remis en état pour prolonger leur durée de vie utile. Les scénarios de fin de vie n'étant pas considérés au premier plan dans cette section.

- Réduire le nombre de pièces : un produit comportant plus de composants prendra plus de temps à assembler et à désassembler, même si ces pièces sont de même nature ou fabriquées des mêmes matériaux. De plus, la maintenance pourrait être plus complexe et spécifique. Principalement concernant les attachements, certaines stratégies d'assemblage peuvent être suivies ; assembler des pièces ensemble en les emboitant, par exemple. (Shetty, 2016)
- Standardiser les pièces et les composants : utiliser des pièces standards quand possible pour des raisons économiques et de fiabilité. Aussi, au niveau environnemental et en regard de l'écoconception, utiliser des pièces standards permet de remplacer des composants brisés plus facilement pour prolonger la durée de vie du produit (Shetty, 2016).

Cependant il faut arriver à trouver un équilibre entre réduire le nombre de pièces et l'utilisation de composants standards, puisque les deux présentent des avantages en lien avec les scénarios de conception de produits. Par exemple, un produit comportant peu de pièces, mais qui seraient non standard pourrait s'assembler et se désassembler plus facilement, mais serait peut-être plus difficile à réparer, en fonction de la disponibilité de ces pièces non standard (Le Moigne, 2018). Cependant, celui-ci serait moins cher à produire et de taille moins importante.

- Faciliter l'accès aux composants : permettre la maintenance et le nettoyage des pièces et des modules. Sans avoir besoin de démonter le produit en entier, les composants brisés ou ayant des durées de vie inférieures au reste du produit pourront être remplacés pour prolonger la durée de vie de celui-ci sans avoir à le remplacer en entier (Chen, 2010).

- Regrouper les matériaux dangereux dans des modules séparés et facilement accessibles : les matériaux dangereux nécessitent souvent un traitement particuliers en fin de vie. Il est toujours pertinent de vouloir récupérer une majorité de ces matériaux pour les réutiliser (Dowie, 1994). Si ce n'est plus possible, dépendamment du matériau, un traitement spécifique permettra d'en disposer de façon sécuritaire pour la santé et pour l'environnement (Le Moigne, 2018).

## **2.2 Facteurs influençant la conception**

### **2.2.1 Impacts de l'environnement sur la conception**

#### **2.2.1.1 Écoconception**

« Concevoir un produit ou un service de la manière la plus respectueuse de l'environnement possible » (Generation, 2018) est la méthode de conception à privilégier. L'écoconception va permettre de concevoir un produit en faisant une analyse du cycle de vie (ACV) qui permet d'examiner chacune des étapes du cycle de vie de celui-ci : extraction des matières premières, fabrication du produit, phase d'utilisation, fin de vie et le transport que l'on retrouve à plusieurs moments dans le cycle. Des logiciels sont disponibles pour effectuer ces analyses. Celles-ci seront effectuées pour chacune des phases individuellement, grâce à des bases de données, afin d'identifier les phases qui ont l'impact le plus important sur l'environnement. Les améliorations effectuées sur ces phases permettront d'obtenir les plus grands bénéfices qui permettront d'améliorer l'impact global du produit.

Devoir se conformer à des contraintes environnementales pour de la conception de produits permet souvent une plus grande créativité de la part des concepteurs, puisque des objectifs précis doivent être atteints. Les consommateurs sont aussi de plus en plus attention aux produits qu'ils achètent. Ce sera donc aux consommateurs d'orienter leurs choix vers des produits ayant un plus faible impact environnemental et dont l'entreprise adopte des valeurs sociales (Équiterre, 2019), par exemple les produits faisant partie de Fairtrade, système de commerce équitable (Fairtrade Canada, 2019). Malheureusement, ce n'est pas la tendance actuelle en termes de consommation, les acheteurs optant souvent pour les produits les moins chers.

### 2.2.1.1 Scénarios de fin de vie

Pour plusieurs raisons, les utilisateurs vont décider de disposer d'un produit pour le remplacer ou simplement puisqu'ils ne l'utilisent plus. Plusieurs raisons peuvent motiver ce choix ; par exemple l'objet est défectueux ou désuet ou bien il ne fonctionne plus assez bien en fonction de l'évolution des attentes des utilisateurs. Après la phase d'utilisation de cet article, les utilisateurs en disposent et celui-ci entre dans la phase de fin de vie. Cette phase peut être critique par rapport au reste du cycle du point de vue environnemental, puisque le fait de ne pas récupérer les pièces ou les matériaux du produit et de l'envoyer à la décharge va faire en sorte que ces ressources seront perdues.

Un travail et des recherches sur les scénarios de fin de vie ont déjà été effectués au département de génie mécanique de Polytechnique Montréal (Remery, 2011). Une méthode avait été bâtie pour identifier le scénario de fin de vie dès les phases initiales de conception de produits. Les propositions effectuées étaient basées sur l'échelle de Lansink (1980) qui hiérarchisait les traitements des produits en fin de vie. Une proposition de 6 scénarios de fin de vie avait été faite, qui seront ceux considérés pour ce travail de recherche. Ces options de fin de vie sont celles présentes dans l'industrie actuellement. Elles sont classées en ordre de préférence en termes de performance environnementale.

Scénarios de fin de vie (Remery, 2011; Catherine Michelle Rose, 2000) :

- Réutilisation : Utilisation d'un produit à nouveau, simplement à la suite d'interventions mineures, telles que le nettoyage ou de simples réparations. Celui-ci répondra à la même fonction que celle pour laquelle il a été conçu (Low, Williams et Dixon, 1996).
- Refabrication : Un produit identique au produit de base ou une version améliorée de celui-ci sera réassemblé à partir de pièces pouvant provenir d'une grande quantité de produits similaires. Les différentes pièces réassemblées seront préalablement inspectées, nettoyées et réparées au besoin.
- Recyclage avec désassemblage : Les matériaux constituant le produit seront recyclés, à la suite d'un tri de ceux-ci par types et compatibilité. Le but étant de récupérer les matières les plus pures possibles.

- Recyclage sans désassemblage : Le produit en entier est broyé puis les matières récupérables sont extraites. Cependant, la pureté des matières récupérées est de beaucoup diminuée par rapport à l'option de fin de vie précédente.
- Incinération avec récupération d'énergie : Incinération du produit et récupération de l'énergie libérée sous forme de vapeur d'eau ou d'électricité.
- Mise en décharge : Aucun traitement à la suite de la phase d'utilisation, les produits désuets sont envoyés aux sites d'enfouissement.

Bien évidemment, plusieurs variantes de ces scénarios existent et peuvent être exploitées dépendamment du secteur industriel et du type de produit.

### **2.2.1.2 Phase de fin de vie impact environnemental**

La phase de fin de vie pourrait être celle qui a le plus d'impact sur l'environnement, surtout si les résidus dangereux ne sont pas traités après leur phase d'utilisation. Le fait d'envoyer dans les sites d'enfouissement des résidus dangereux non traités peut avoir une incidence importante sur les écosystèmes et sur la santé. Ces mauvaises pratiques pourraient entraîner le déversement de produits ou l'émanation de gaz toxiques des sites d'enfouissement à ciel ouvert (Quintus, 2007).

Envoyer en décharge des produits en fin de vie entraîne la fin de leur vie utile et leur sortie de la boucle d'utilisation. Comme ces matériaux ne sont pas recyclés ou réutilisés, il sera nécessaire d'extraire de nouvelles matières premières pour subvenir à la demande de cette ressource. En observant les échelles de scénarios de fin de vie, il existe toujours l'incinération avec récupération d'énergie comme dernier recours avant l'enfouissement. Cependant, il est vrai que certains matériaux toxiques ne peuvent pas être incinérés et doivent nécessairement être enfouis. Dans ces cas, il sera primordial de traiter ces résidus avant leur mise en décharge (Remery, Mascle et Agard, 2012).

## **2.3 Choix de conception**

### **2.3.1 Conceptions en vue de la fin de vie**

Un objectif spécifique peut être voulu lors des premières étapes de conception d'un nouveau produit, sans nécessairement être de réduire les coûts. Ces choix peuvent être motivés par les

objectifs de la compagnie ou bien pourraient simplement être pour répondre à une demande du marché (Li, Zhao, Zheng, Wang et Wang, 2014).

La conception pour la fin de vie est assez complexe à effectuer, puisque prédire l'état d'un produit en fin de vie utile n'est pas une tâche simple; une multitude de facteurs sont hors de contrôle du concepteur (Meerkamm et Koch, 2005). Pourtant, il est nécessaire de tenter de répondre aux besoins du mieux possible pour faciliter le traitement des produits. Les méthodes de conceptions en vue de la fin de vie font partie de stratégies pour concevoir des produits avec un but précis de production, d'utilisation, de fin de vie ou bien de maintenance. Par exemple, un modèle de conception en vue de l'assemblage fera en sorte que cette étape sera facilitée, portant attention à des éléments tels que : les instructions sur la chaîne de montage sont claires, la forme des pièces est ergonomique ou bien les outils sont faciles à utiliser (Shetty, 2016). Bien sûr, cela facilite, par le fait même, les opérations de désassemblage.

Pour la conception en vue de la fin de vie, une option est identifiée, ainsi que des objectifs spécifiques, puis des moyens seront pris pour privilégier un scénario pour permettre un meilleur traitement après sa vie utile.

Ces différentes méthodes de conceptions pourraient être combinées pour permettre de répondre à plusieurs exigences à la fois. Une pondération des critères d'évaluation serait une avenue possible pour accorder une importance justifiée à chacun de ces aspects.

### **2.3.1.1 Conception en vue de la maintenance**

La conception en vue de la maintenance n'est pas en soi un scénario de conception en vue de la fin de vie, cependant cela facilite l'assemblage et le désassemblage, ainsi que les opérations pour prolonger la durée de vie des objets. Les coûts relatifs de ces opérations tendent donc à diminuer. Des éléments de cette stratégie de conception sont donc importants à prendre en compte pour concevoir des items complexes (Pahl, Beitz, Feldhusen et Grote, 2007).

La maintenance des produits est vitale pour permettre une utilisation optimale des produits ainsi que de permettre de prolonger leur phase de vie utile. Cela permet aussi de faciliter leur entretien, qu'il soit préventif ou curatif. Les opérations qui devront être réalisées pendant cette phase sont principalement le démontage, le nettoyage et le contrôle. Pour ce faire, il faut porter une attention particulière à la quantité de pièces qui devront être assemblées et leurs formes (Shetty, 2016). Un

nombre trop important de pièces dans la composition du produit augmenterait la difficulté d'assemblage de celui-ci et nécessiterait plus de temps. Il faut aussi garder en tête l'accessibilité des composants qui nécessiteraient un entretien plus fréquent (Le Moigne, 2018).

### **2.3.1.2 Conception en vue de la réutilisation**

Ce type de conception sera utilisé si l'objectif est de créer un produit qui pourra, en fin de vie et à la suite de quelques interventions mineures, être réutilisé presque tel quel. Les interventions mineures prévues incluent du nettoyage et des réparations simples. La fonction du produit reste inchangée à la suite des manipulations en fin de vie.

Afin de faciliter la réutilisation, il faudra miser sur une stratégie de conception qui permettra un accès facile aux composants dont les durées de vie sont plus courtes pour pouvoir les remplacer et prolonger la durée de vie globale du produit. L'emploi de composants à durées de vie courtes est à proscrire puisque l'objectif est d'en conserver une majorité et permettre la réutilisation du produit (Kimura, Kato, Hata et Masuda, 2001).

Les avantages de cette méthode de conception sont de permettre une réduction à la source de nouveaux produits fabriqués, puisque ceux en service restent plus longtemps dans la boucle d'utilisation. La demande de pièces neuve se limite à des catégories de pièces de rechange, contrairement à un produit en entier; diminuant ainsi l'énergie utilisée pour l'extraction de matériaux et pour le processus de fabrication. Dans la même optique, moins de déchets sont ainsi générés par ce type de produits; seulement certaines pièces ou certains modules seront considérés comme résidus (Le Moigne, 2018).

Cependant, la récupération des produits à la suite de leur cycle de vie est l'élément problématique de ce mode de fonctionnement, puisque les consommateurs s'en débarrassent de la façon la plus simple pour eux, en majorité. Donc, bien que l'entreprise soit responsable du traitement de ses produits en fin de vie, si la récupération de ceux-ci est difficile, cela pose un problème. Une étude du marché est nécessaire pour permettre l'implantation d'un modèle cohérent et fonctionnel.

### **2.3.1.3 Conception en vue du recyclage**

Le recyclage peut être une option intéressante si la majorité du produit ne peut être réutilisée en fin de vie. La solution de récupérer les matériaux pour les recycler est donc avantageuse. Il existe deux types de recyclage en fin de vie : le recyclage avec désassemblage et le recyclage sans

désassemblage, qui ont été retenus pour la conception de l'outil ELDA (Catherine Michelle Rose, 2000). Cette distinction des deux types de recyclage est issue de la différence de pourcentage de matière récupérée pour chacun d'eux. Pour les deux alternatives, les matériaux seront broyés en petits copeaux puis recyclés. Le désassemblage préalable permet de séparer les pièces du produit avant que celles-ci soient broyées, pour favoriser un premier tri des pièces et donc des matériaux. Les copeaux récupérés une fois les pièces broyées auront donc un degré de pureté supérieur.

Pour les deux types de recyclage, la sélection des matériaux lors de la conception sera importante puisque si les matériaux des pièces et des modules ne sont pas séparables ou compatibles, une fois en fin de vie, le recyclage de ceux-ci ne sera pas possible. Les choix de conception doivent donc être effectués judicieusement pour un meilleur traitement et une récupération en fin de vie (Seaver, 1994).

Pour le recyclage avec désassemblage, il faudra mettre l'accent sur le type d'attaches qui relieront les pièces et les modules. Le désassemblage devra se faire, le plus possible, sans nécessiter une grande quantité d'outils différents, pour permettre un désassemblage plus efficace. Les adhésifs et autres additions de matière non réversibles pour les assemblages sont donc à proscrire.

Tout comme la conception en vue de la réutilisation, recycler les matériaux permet de réduire la demande à la source, permettant de garder ces matériaux dans la boucle d'utilisation, réduisant par le fait même la quantité de résidus générés (Masclé et Xing, 2009).

#### **2.3.1.4 Conception en vue du désassemblage**

Cette option de fin de vie est assez similaire à celle du recyclage avec désassemblage, le but étant de permettre de réparer les composants le plus facilement possible. Si les composants peuvent facilement être séparés, la réparation et le remplacement des pièces peuvent mieux s'effectuer, prolongeant la durée de vie du produit (Gupta et Lambert, 2004). Le nettoyage des pièces est aussi favorisé.

La facilité de désassemblage est caractérisée par trois facteurs : la consommation d'énergie, le type d'outils utilisés pour le désassemblage et le nombre d'opérations nécessaires (Huang, Liang, Chuang et Chang, 2012). Le nombre d'opérations va influencer directement sur le temps du désassemblage.

### 2.3.2 Conception fonctionnelle de produits

La conception fonctionnelle de produits est intégrée dans le raisonnement fonctionnel (functional reasoning) présenté par le Professeur Mogens Myrup Andreassen de l'Université danoise DTU. Le raisonnement fonctionnel trouve son inspiration de modèles existants, tels que l'approche botanique (botanical approach), qui propose de travailler avec des éléments concrets, non dans l'abstrait comme d'autres approches de conception, ou l'approche fonctionnelle qui place les fonctions de l'avant. C'est principalement cette deuxième partie qui présente un intérêt dans ce projet de recherche; c'est-à-dire placer les fonctions au centre de la méthode de conception.

Pour mieux comprendre et décomposer un produit, il est encouragé de le faire par flux ou par sous-systèmes. Une approche des types de flux est présentée par Hubka, en proposant quatre, soit : la transformation d'énergie, de matière, d'information ou le changement d'état ou de position d'objets vivants (Hubka, 1988), présenté dans la Figure 2.1, traduite à partir de l'originale. Les quatre flux entrent dans un système et sont transformés puisqu'ils sont en contact avec le système technique et peuvent subir une certaine intervention humaine.

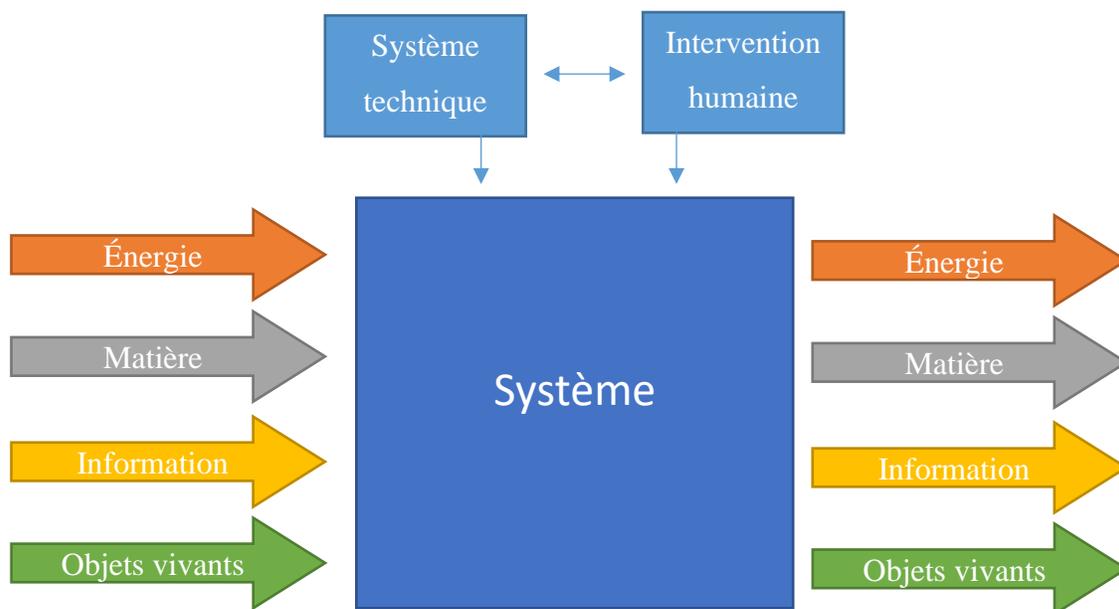


Figure 2.1 Décomposition des flux d'un produit (Hubka, 1988)

Basé sur cette décomposition selon les différents flux, le système étudié peut aussi être décomposé en sous-systèmes qui répondent chacun à une fonction spécifique du produit. Ces sous-systèmes sont :

- Système principal (working system) : éléments permettant la réalisation de la fonction principale du produit, ce pour quoi il a été conçu.
- Système de force motrice principale (Prime mover or energy system) : ce qui fournit l'énergie aux différents systèmes pour qu'ils répondent à leurs fonctions respectives.
- Système de distribution et transmission d'énergie (transmission or energy distribution system) : pièces qui permettent d'acheminer l'énergie vers tous les composants.
- Système de contrôle (control system) : tous les composants permettant de contrôler, réguler les différents éléments et pouvant même réagir aux différents événements subis par le système.
- Système châssis (frame system) : permet de retenir les différentes pièces et les différents systèmes les uns par rapport aux autres dans l'espace.
- Système auxiliaire (helping system) : facilite le travail des autres systèmes pour un fonctionnement optimal du produit. Par exemple, un ventilateur qui refroidit la température interne d'un appareil électronique pour en assurer le bon fonctionnement.

Cette décomposition est une base qui peut être adaptée en fonction du type de produit. En fonction de la complexité de ceux-ci, certains systèmes peuvent être combinés ou non pertinents pour certains produits (Andreasen, Hansen et Cash, 2015).

## 2.4 Conception modulaire

### 2.4.1 Critères de conception modulaire

Pour concevoir des produits modulaires, des critères ont été établis pour permettre d'orienter cette conception. Ce sont des principes, à la fois utiles pour les étapes préliminaires de conception et pour les opérations d'assemblage ou toute autre étape de manipulation du produit.

- **Critère ergonomique** : adapter les modules pour faciliter l'assemblage;
- **Critère fonctionnel** : mettre les fonctions du produit au cœur de la conception modulaire;
- **Critère géométrique** : organiser les modules en fonction des contraintes physiques des composants entre eux. Il est aussi important de tenir aussi compte de leur compatibilité et de leurs incompatibilités, c'est-à-dire les avantages d'avoir ces deux éléments à proximité, ou leur nuisance s'ils sont trop près; (Yahiaoui, 2009)

D'autres critères liés à l'organisation de la production et des moyens économiques existent, par contre, ils ne sont pas pertinents pour ce projet.

### 2.4.2 Types de modules

Les différents modules qui composent un objet sont regroupés en catégories pour permettre de mieux les identifier. En fonction du niveau de décomposition du produit, la classification des modules pourrait varier légèrement.

**Module de base** : Répond aux fonctions de base du produit. Essentiel au fonctionnement du produit.

**Module auxiliaire** : Rattaché au module de base pour créer différents produits. Ces produits pourraient possiblement faire partie d'une famille différente de produits.

**Module adaptif** : Permet à deux pièces ou systèmes d'être adaptés l'un à l'autre. Ces modules permettent d'augmenter les fonctionnalités d'un module de base.

**Non-module** : Ce n'est pas un module en soi, c'est un composant

### 2.4.3 Types de modularité

La modularité peut être utilisée pour la conception de tous types d'objets. Par exemple, des outils, des appareils mécaniques ou du mobilier. Peu importe l'application, la façon dont les modules interagissent ensemble est semblable.

**Échange de composants :** Des modules auxiliaires peuvent être assemblés avec le même module de base pour créer des variantes de produit appartenant à la même famille de produits. Exemple : tournevis avec têtes interchangeables.

**Partage de composants :** Différents modules assemblés au même composant de base peuvent former des produits appartenant à différentes familles. Exemple : Un mélangeur avec différents accessoires.

« **Bus modularity** » : Des modules ne peuvent être assemblés ensemble directement et ont besoin d'un module intermédiaire pour communiquer entre eux. Exemple : des ports USB et les accessoires associés.

**Modularité sur mesure :** De légères différences entre les modules peuvent avoir lieu. Exemple : câbles informatiques de différentes longueurs.

« **Mix Modularity** » : Un assemblage de différents modules crée un nouveau composant. Exemple : des peintures de couleur.

**Modularité de section :** Plusieurs modules standards assemblés ensemble. Exemple : canapé avec différentes configurations.

(Agard, 2002; Huang et Kusiak, 1998)

### 2.4.4 Attachements

Les attachements sont les liens entre les pièces distinctes ou les divers modules. Ils peuvent avoir plusieurs caractéristiques et peuvent être de nature différente. Ils sont donc utilisés en conception pour relier deux éléments entre eux. Le choix des types d'attachements à l'intérieur même d'un module ou entre deux modules est effectué en fonction des types de modules et selon différents critères de conception. Le choix de fin de vie va aussi avoir un impact sur ces choix.

### 2.4.4.1 Caractéristiques des attachements

Il existe, dans la littérature, cinq qualificatifs pour chacun des attachements. Pour chaque catégorie, deux caractéristiques opposées sont présentées et l'attachement étudié aura un pourcentage d'appartenance à l'une ou l'autre.

Une échelle du type « Likert Scale » (Likert, 1932) pourrait être utilisée pour évaluer chaque attachement. Pour le critère flexibilité par exemple, le déplacement de pièces rattachées entre elles pourra être étudié, en comparant les valeurs obtenues à des valeurs types. On pourra donc dire que cet attachement est plus ou moins flexible. Voici les différents types d'attaches (Masclé et Xing, 2009) avec un exemple pour chacun.

- a) **Flexibilité de l'attachement** : capacité à se faire déformer.
  - Attache flexible : Un élastique;
  - Attache non flexible : Une vis.
- b) **Intégrité de l'attachement** : effet du désassemblage sur l'attachement lui-même (détruit ou intact).
  - Lien fort : Un rivet;
  - Lien faible : Un boulon.
- c) **Intégrité des pièces** : effet du désassemblage sur les pièces attachées.
  - Pièces intactes : Pièce réutilisable;
  - Pièces altérées : Pièces brisées, non réutilisables.
- d) **Outils nécessaires pour le désassemblage** : quantité et type d'outils essentiels pour bien démonter le produit.
  - Outils manuels : Outil sans apport d'énergie interne;
  - Outils motorisés : Outil comprenant une source d'énergie pour fonctionner.
- e) **Temps nécessaire pour la dissociation** : plus l'attachement est solide, plus le temps nécessaire pour le désassemblage sera important.
  - Attachement solide : Nécessite un certain temps à défaire;
  - Attachement faible : Se désassemble facilement et rapidement.

#### 2.4.4.2 Changement des propriétés

La phase d'utilisation des produits est très peu prévisible, puisque le concepteur a peu de contrôle sur la façon avec laquelle le produit sera utilisé par le consommateur. Il est possible que la maintenance, par exemple, ne soit pas effectuée régulièrement et que les systèmes ne soient pas utilisés sous conditions optimales. Les pièces ainsi que les attachements peuvent donc être soumis à des contraintes non prévisibles qui altèrent l'intégrité des pièces. Cependant, il est essentiel d'en tenir compte du mieux possible, pour permettre un meilleur traitement en fin de vie. Le vieillissement des attachements pourrait nuire à l'exécution de la fin de vie initialement planifiée si le produit ne peut être désassemblé facilement.

Les modifications de propriétés des attachements sont regroupées selon deux catégories : le vieillissement et la déformation.

1. Vieillessement : Causé par une utilisation prolongée sous des conditions non favorables qui entraîne une modification des propriétés physiques et chimiques des pièces ou des attachements.
  - Les liens se brisent/ se désintègrent, causé par le déplacement de pièces à l'intérieur du produit pendant son utilisation;
  - Les liens deviennent difficiles à briser, causé par de réactions chimiques telles l'oxydation ou la rouille entre les attachements et les pièces.
2. Déformation : Causé par différents stress ou des charges externes importantes.
  - Expliqué par des connexions et déconnexions fréquentes, durant les phases d'utilisation ou de maintenance;
  - Souvent nuisible pour le désassemblage, ce qui pourrait entraîner le bris des pièces rattachées.

(Masclé et Xing, 2009)

#### 2.4.5 Avantages de la conception modulaire

La modularité présente de nombreux avantages, autant pour les fabricants que pour les clients des produits fabriqués. Ces éléments sont présentés dans le chapitre écrit par Karl Ulrich dans Management of design (Ulrich, 1994). Ces avantages sont à la fois importants pour la conception des produits, mais aussi pour le côté économique de la mise en marché de nouveaux items. Ceux-

ci peuvent aussi influencer les entreprises, qui font constamment face aux décisions relatives à maximiser les revenus avec les produits actuels ou investir dans le développement de nouveaux produits.

Économie d'échelle pour les composants : Les modules utilisés dans l'assemblage de produits modulaires sont standardisés et répondent à une fonction. Ceux-ci peuvent donc être fabriqués en grande quantité et utilisés dans différents produits, de mêmes familles ou de familles différentes. Cela permet de réduire les coûts de fabrication ainsi que le coût d'achat du produit par le client, le rendant plus abordable.

Changement de configuration du produit : Une modification de configuration du produit est plus facilement réalisable lors de l'utilisation de modules, puisque c'est un assemblage d'éléments standards. La mise à niveau ou personnalisation d'un produit existant est alors plus facile. Dépendamment du type de produit, la fréquence de ces changements est variable.

Variété de produits : Comme il existe un grand nombre de composants standardisés, une grande quantité d'objets peuvent être générés à partir de ceux-ci. Le choix d'intégrer certains modules dans un produit va dépendre des fonctions que le produit devra satisfaire. C'est en combinant des sous-assemblages de base entre eux qu'une grande quantité de produits pourra être constituée. Aussi, la possibilité d'assembler des non-modules au système existant permet de personnaliser les offres aux clients. Cette variété d'association de modules est issue d'un effort de design efficace.

Flexibilité des utilisations : Permet une plus grande flexibilité durant la phase d'utilisation du produit; le fait que plusieurs modules puissent être interchangeés augmente la versatilité de celui-ci.

Délais de fabrication : Comme les produits sont en grande partie construits de pièces modulaires, souvent standardisées, assemblées entre elles, le produit commandé pourra être livré en un temps plus court que pour un produit classique.

Facilité de réparation et maintenance : La maintenance d'un produit prolonge sa durée de vie, puisqu'il permet une utilisation de celui-ci dans des conditions optimales. Remplacer les pièces usées ou brisées permet de continuer à utiliser l'objet sans avoir besoin de le remplacer.

(Pahl et al., 2007)

### **2.4.6 Limites de la conception modulaire**

Bien que la conception modulaire comporte beaucoup d'avantages, elle peut présenter des défis pour les concepteurs, les fournisseurs et les acheteurs. Ces défis sont reliés au fait qu'un processus important de conception a lieu en début de processus de fabrication, puis rarement remis en question une fois que la production est lancée.

Besoins uniques et spécifiques de clients particuliers moins facilement réalisés : Comme les produits sont fabriqués à partir de pièces standardisées, une demande pour une fonction qui n'existe pas déjà va engendrer des coûts de conception plus élevés. Cela est dû au fait que de nouvelles pièces, de nouveaux modules ou de nouveaux sous-assemblages devront être conçus pour s'intégrer aux modules existants pour satisfaire les exigences particulières du client.

Produits de taille plus importante : Comme les objets conçus sont formés de blocs répondant à des fonctions, leur volume et leur poids pourraient être plus importants que des items de conception conventionnelle.

(Pahl et al., 2007)

## **2.5 Méthodes de conception de produits modulaires**

Bien comprendre le produit à l'étude est essentiel, puisque c'est une étape préliminaire du processus de conception. Dans la littérature, une grande quantité de méthodes de conception de produits modulaires sont élaborées et présentées. Pour faciliter la compréhension, elles ont été regroupées en deux types ; un premier type présentant une décomposition des fonctions principales pour en expliciter un modèle interne et d'autres exploitant les interactions des pièces entre elles pour les regrouper en modules. Dépendamment de l'objectif du concepteur, il pourra décider de la méthode à exploiter. Une combinaison ou inspiration de ces méthodes peut aussi être à la base de son travail de conception. Les ressources disponibles peuvent aussi influencer sur le choix, puisque certaines nécessitent des outils informatiques performants, en fonction de la taille du produit.

## **2.5.1 Méthodes basées sur les fonctions**

Les méthodes basées sur les fonctions permettent une première approche d'une conception d'un produit modulaire. Elles découlent dans un premier temps, d'une bonne compréhension du produit dans son ensemble, puis d'une décomposition de celui-ci en modules en explicitant leurs interactions. Il est important de déterminer le niveau de décomposition souhaité pour le modèle ; puisque l'architecture peut être simple ou très complexe pour un même produit.

### **2.5.1.1 Architecture modulaire –Eppinger & Ulrich**

Eppinger et Ulrich proposent un modèle dont le but principal est d'illustrer et schématiser les interactions géométriques entre les pièces et les sous-assemblages (Eppinger et Ulrich, 2012). Une schématisation fonctionnelle ou structurelle de l'objet sera l'élément de base de la méthode, puis les composants seront regroupés selon une liste de 7 critères et les agencements résultants seront testés. Finalement, chaque groupement sera identifié et les interactions internes pour chacun d'eux seront documentées en fonction de leur nature. Le résultat sera un schéma de boîtes reliées entre-elles par des liens caractérisés par les interactions entre ces blocs (Ulrich, 1994).

### **2.5.1.2 Design de produits mécaniques – Pahl & Beitz**

Pahl et Beitz décrivent une méthodologie en quatre étapes qui permet d'établir la structure générale du produit suivant la taille, la forme et l'emplacement des modules et des composants (Pahl et Beitz, 1995). Celui-ci prend naissance des fonctions et des composants du produit en explicitant les interactions entre ces dernières.

### **2.5.1.3 Modèle fonctionnel – Stone & Wood**

Stone et Wood quant à eux, proposent le modèle de la boîte noire pour représenter le produit, en tant que première approche au problème de conception, en illustrant trois types de flux possibles: énergie, information et matière, présenté dans la Figure 2.2.

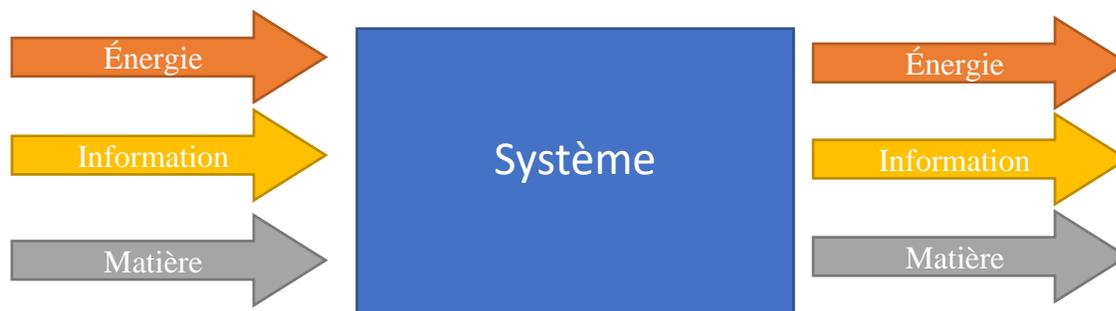


Figure 2.2 Modèle de Stone et Wood (Stone et Wood, 1999)

Des chaînes fonctionnelles internes par flux seront réalisées par la suite, entre les différents composants du produit (Stone et Wood, 1999). Ce modèle fut bonifié l'année suivante en incluant l'organisation géométrique des composants et un réel design du produit en traduisant les fonctions recherchées par des composants physiques (Stone, Wood et Crawford, 2000).

### 2.5.2 Méthodes matricielles

Une autre stratégie de conception de l'architecture d'un produit passe par l'utilisation des matrices. Celles-ci permettent une représentation plus facile des interactions entre les pièces et composants pour les produits plus complexes. Un autre avantage de passer par des méthodes matricielles permet une informatisation plus aisée des étapes de regroupement de pièces entre-elles pour former des modules. Cependant, comme les méthodes basées sur les fonctions donnent une bonne vision d'ensemble du produit en entier, il peut être stratégique d'inclure des étapes préliminaires aux méthodes matricielles pour une conception plus efficace.

Deux types de matrices sont utilisées dans ces méthodes :

- Matrice de relation (interaction matrix) : matrice représentant les relations entre les composants du produit, évalués 2 à 2. Chaque indice  $A_{ij}$  correspond à l'interaction entre le composant  $i$  et le composant  $j$  - le nombre représentant la force ou bien la quantité de liaisons entre ceux-ci.
- Matrice de compatibilité (suitability matrix) : matrice illustrant la compatibilité de 2 composants  $i$  et  $j$  à être à proximité l'un de l'autre. Certaines méthodes ayant jusqu'à illustrer la nuisance de deux composants d'être trop à proximité l'un de l'autre.

Une fois que la matrice est complétée, le regroupement des composants en modules se fait grâce à l'algorithme de triangularisation de Kusiak, qui sera détaillé en 2.5.2.4.

### **2.5.2.1 Simulated annealing approach – Gu & Sosale**

Le but de cette méthode est de représenter le degré d'interaction entre les composants d'un produit. La matrice qui sera réalisée est une matrice symétrique quantifiant les interactions entre les composants de 0 à 10. S'il n'y en a aucune, le chiffre 0 sera inscrit dans la case, si l'interaction entre deux composants est très importante, alors le chiffre 10 y sera inscrit (Gu et Sosale, 1999).

### **2.5.2.2 Design Structure Matrix Based approach – Dong et Whitney**

L'approche utilisant la Design Structure Matrix (DSM), permet, elle aussi de représenter les interactions entre les composants, sans accorder d'importance à l'intensité de la relation entre les composants. Le but sera donc de maximiser la quantité d'interactions entre les groupes et de minimiser celles avec l'extérieur, du point de vue purement qualitatif (Dong et Whitney, 2001).

### **2.5.2.3 Integration analysis methodology – Pimmler & Eppinger**

La méthode prônée par Pimmler et Eppinger permettra de quantifier les interactions dans un produit en fonction de leur type. Une fois que le système étudié aura été décomposé en éléments, l'étude des interactions entre ceux-ci pourra débuter. Une méga matrice symétrique comprenant 4 indices par case sera créée pour représenter, pour chacun des composants, les types d'échanges entre les pièces. Les différents flux étant : proximité, information, énergie et matière. Les coefficients dans les matrices seront positifs et négatifs, variant entre -2 et +2, de nuisible à nécessaire, avec 0 étant indifférent. L'étape de regroupement des composants en modules est plus complexe, mais un type d'échange pourrait être à prioriser, en fonction des objectifs de conception et les algorithmes de regroupements appropriés facilitent le travail (Pimmler et Eppinger, 1994).

### **2.5.2.4 Algorithme de triangularisation de Kusiak**

L'algorithme de triangularisation de Kusiak fait partie des algorithmes de regroupements de composants dans une matrice. Cet algorithme est assez simple à comprendre, à utiliser et à implanter dans un modèle informatique. Il s'agit d'effectuer des manipulations pour modifier l'ordre des éléments dans la matrice pour regrouper les composants ayant le plus d'interactions ensemble. Triangulariser une matrice veut dire de regrouper les coefficients des interactions d'un côté de la diagonale pour pouvoir identifier facilement et visuellement les cycles, donc les modules (Huang et Kusiak, 1998).

## **2.6 Économie circulaire**

### **2.6.1 Présentation de l'économie circulaire**

L'économie circulaire est un modèle de production-consommation qui intègre des boucles de réutilisation, refabrication et recyclage dans un système linéaire pour permettre une utilisation optimale des ressources et matériaux disponibles (Sauvé et al., 2016). Dans un modèle d'économie linéaire, les matières premières extraites sont utilisées dans la conception de pièces et produits, utilisées et sortent de la boucle d'utilisation en étant incinérées avec récupération d'énergie ou envoyées aux sites d'enfouissement si leur qualité est fortement dégradée (Le Moigne, 2018). Contrairement à ce constat, le but de l'économie circulaire est de conserver les matériaux le plus longtemps dans la boucle d'utilisation avant d'en disposer. Une des raisons principales de l'intérêt pour l'économie circulaire est la surexploitation des ressources naturelles et l'épuisement des minéraux. Les composants de produits électroniques sont, par ailleurs, fabriqués en partie de ces matériaux, donc il est primordial de s'intéresser à ce sujet.

### **2.6.2 Principes de l'économie circulaire**

Pour permettre le bon fonctionnement de ce modèle, il est impératif de s'appuyer sur des fondements. Ceux-ci sont présentés par Chouinard et al (Chouinard, Pigosso, McAloone, Baron et Achiche, 2019) comme étant :

1. Réduire l'impact environnemental des produits;
2. Optimiser l'utilisation des ressources, durant les phases de conception, production et utilisation des produits;
3. Concevoir et mettre en marché des produits conçus pour être réutilisés, refabriqués et recyclés;
4. Utiliser des énergies renouvelables pendant les phases de conception et d'utilisation du produit;
5. Créer de nouveaux modèles économiques pour encadrer cette industrie et encourager les consommateurs à prendre part au mouvement.

Tel que présenté, il est bien évidemment que les producteurs ont une grande part de responsabilité dans ce type d'économie, mais les consommateurs peuvent aussi modifier leurs habitudes de consommation pour effectuer une transition vers ce mode de fonctionnement. Par contre, cette transition est un effort de longue haleine, qui est très difficile à implanter à grande échelle.

### **2.6.3 Conception de produits mécatroniques dans un contexte d'économie circulaire**

Les produits mécatroniques sont composés d'éléments mécaniques, électriques ou électroniques et d'un système de contrôle (Chouinard et al., 2019). Puisque ceux-ci se retrouvent dans un grand nombre de domaines, ce sont plusieurs langages et méthodologies qui sont utilisés, rendant plus difficile la communication entre les secteurs de l'industriel (Mørkeberg Torry-Smith et al., 2012). Bien que les notions d'économie circulaire devraient guider la conception de nouveaux produits, il a été démontré que les concepteurs n'en détiennent pas de bonnes connaissances (Sumter, Bakker et Balkenende, 2017). Un des facteurs qui pourrait améliorer grandement la quantité de produits réutilisés et refabriqués serait que les concepteurs préviennent le mieux leur obsolescence, c'est-à-dire qu'ils conçoivent des produits en ayant en tête la réutilisation ou le recyclage d'une majorité de pièces (Chouinard et al., 2019; den Hollander, Bakker et Hultink, 2017). Les produits conçus pour l'économie circulaire devraient être pensés pour l'avenir et devraient être facilement désassemblables (Van Beek, Erden et Tomiyama, 2010). Cette deuxième recommandation rejoint les principes généraux de conception de produits et les principes guidant les attachements entre les pièces. Toutes ces stratégies ont bien sûr pour objectif de prolonger la vie des produits le plus possible en favorisant la maintenance et la réparabilité de ceux-ci (Chouinard et al., 2019).

Les produits conçus pour l'économie circulaire devraient donc :

- Avoir une longue vie utile;
- Être désassemblables;
- Être réparables;
- Pouvoir être mis à niveau;
- Être recyclables.

(Chouinard et al., 2019).

## CHAPITRE 3 JUSTIFICATION DU PROJET

### 3.1 Mise en contexte

Lors de la création d'un nouveau produit ou lors de la reconception d'un produit existant, des stratégies et des méthodes de conception sont choisies. Le choix des méthodes dépend des buts principaux qui seront visés et une combinaison de plusieurs critères est envisageable. Ces objectifs peuvent être influencés, par exemple, par la vision de la compagnie, des cibles gouvernementales ou bien des critères de performance. Plusieurs des méthodes existantes se concentrent sur un objectif spécifique ou pour un certain type de produits. Un bon nombre de méthodes de conception de produits modulaires existent et une liste non exhaustive a été établie dans la revue de littérature. Il en est de même pour la conception pour la fin de vie, avec une fin de vie particulière identifiée dès les premières étapes.

Cependant, une fin de vie spécifique est déterminée pour le produit en entier, faisant principalement référence à la méthode End-of-Life Design Advisor, communément appelée ELDA (C. M. Rose, Stevels et Ishii, 2000) est un outil informatique qui permet de proposer à son utilisateur la fin de vie recommandée pour un produit en entier, suite à une série de questions basées sur des critères préalablement établis. En revanche, ce scénario de fin de vie proposé est à l'échelle du produit et non du module. Ce sera le but de la méthode proposée, de suggérer l'option de fin de vie appropriée pour les différents modules d'un produit. Comme, dans un produit modulaire, un lien direct devrait exister entre les fonctions d'un produit et les modules répondant à ces fonctions, une association entre la fonction du produit et la fin de vie associée pourra être suggérée.

### 3.2 Problématique

Ce projet de maîtrise a pour but de répondre à la question de recherche qui suit :

Comment faciliter l'intégration de la fin de vie dans la conception de nouveaux produits?

À travers la sous-question spécifique suivante : Quelle est la méthode la plus efficace pour établir le lien entre les modules répondants aux sous-fonctions d'un produit et les fins de vies associées?

### 3.3 Objectif principal et objectifs spécifiques

L'objectif principal de ce projet de maîtrise est de diminuer l'impact environnemental de la fin de vie des produits modulaires complexes.

Pour ce faire, il faudra :

1. Développer une association entre les fonctions d'un produit et ses modules;
2. Développer un outil permettant de déterminer une fin de vie pour chaque module dès la phase de conception;
3. Déterminer la fin de vie appropriée ayant le plus petit impact environnemental pour chaque module;
4. Orienter la conception selon la fin de vie proposée pour chaque module.

### 3.4 Méthodologie

Pour atteindre les objectifs présentés plus haut, une série d'étapes devra être effectuée. Ce sera la méthodologie qui guidera le travail de recherche.

1. Effectuer une recherche bibliographique des sujets principaux étudiés pour situer la contribution du travail de recherche;
2. Identifier les processus de conception modulaire existants pour en ressortir leurs particularités;
3. Sélectionner les scénarios de fin de vie qui seront considérés pour l'étude;
4. Situer l'outil proposé dans le processus de conception de produits;
5. Établir les étapes d'application de l'outil et la stratégie d'évaluation des critères étudiés;
6. Sélectionner les critères d'évaluation des modules par combinaison de données issues de la littérature;
7. Appliquer l'outil à une série de produits sélectionnés pour vérifier son application;
8. Valider l'outil développé en comparant les résultats obtenus avec des études existantes sélectionnées de la littérature.

### 3.5 Portée du projet

Pour permettre la meilleure utilisation de l'outil proposé, des hypothèses simplificatrices pour limiter la portée sont considérées :

- Les coûts des opérations de fin de vie ne sont pas considérés pour cette étude;
- Les critères de fin de vie pour chacun des modules sont à appliquer une fois que ceux-ci sont séparés les uns des autres;
- Tous les produits sont considérés comme étant en phase de maturité de leur cycle de vie;
- La fin de vie d'un module peut être déterminée dès la phase de conception d'un produit;
- Le lien entre la fonction d'un module et la fin de vie de celui-ci est direct, et ce, peu importe le type ou la catégorie de produits.

Ces hypothèses auront, bien sûr, une influence sur les solutions proposées, mais l'objectif était de proposer des meilleures solutions d'un point de vue environnemental et dans les meilleures conditions possibles.

## **CHAPITRE 4 MÉTHODE DE CONCEPTION DE PRODUITS MODULAIRES EN VUE DE LEUR FIN DE VIE**

### **4.1 Situation de la méthode dans le processus de conception de produits**

#### **4.1.1 Outil de conception pour la fin de vie**

Comme mentionné plus tôt, la conception pour la fin de vie peut être exploitée grâce à plusieurs méthodes, en concevant pour un scénario spécifique. Des recherches ont été menées à l'Université de Stanford afin d'élaborer un outil permettant de mieux déterminer la fin de vie recommandée pour un produit, selon ses caractéristiques (Catherine M. Rose et Ishii, 1999). En analysant des études de cas de conception de produits, l'équipe a pu, tout d'abord, déterminer une liste de 24 critères qui sont à prendre en compte lors de cette étape, pour ensuite choisir les 6 plus pertinents dans leur cas. Un outil informatique a été élaboré et il exploite un arbre de classification composé de 7 variables, qui propose une option de fin de vie à privilégier pour le produit en entier (Catherine Michelle Rose, 2000). Comme l'objet central de ce processus est le produit en entier, elle ne peut être appliquée directement aux modules. Les critères étudiés pourront servir de base pour la proposition de ce travail concernant les modules.

#### **4.1.2 Aperçu du processus de conception**

La conception de produits modulaires en vue de leur fin de vie doit tenir compte des deux concepts primordiaux, sans quoi la méthode ne répondra pas aux exigences. Il faut tout d'abord s'assurer que le produit étudié est bien modulaire, puis déterminer quelle fin de vie sera appropriée pour celui-ci. Tel qu'énoncé plus tôt dans les définitions, un produit modulaire est un élément divisé en modules distincts qui répondront chacun à une sous-fonction spécifique du produit pour en réaliser sa fonction principale. Pour les fins de vies considérées, l'objectif sera de proposer celle qui correspond le mieux au module en question et qui présente le moins grand impact environnemental.

Le processus de conception présenté est inspiré d'expériences et de connaissances transmises par feu Pr Christian Mascle Ph. D (Mascle et Xing, 2009; Remery et al., 2012; Sy et Mascle, 2011).

Afin de visualiser efficacement les différentes étapes du processus, une représentation grâce à l'outil SIPOC (Supplier, Input, Process, Output, Customer) a été utilisée, explicitant les intrants et les extrants du processus ainsi que les fournisseurs et les clients des différentes activités. C'est une représentation qui fait partie des outils Six Sigma à appliquer dès l'initiation d'un processus (Brown, 2019). Un code de couleur a été utilisé pour mieux visualiser, décrit dans la légende de la Figure 4.1. De plus, un rectangle noir a été tracé autour de la méthode, pour illustrer la frontière entre les interventions du concepteur et la solution proposée. L'outil d'aide à la conception est l'élément central de la méthode; on le retrouve dans l'encadré orange.

Les étapes en elles-mêmes ne sont pas détaillées puisque c'est une vision globale du processus qui est voulue. Plusieurs bases de données seront nécessaires et seront utilisées comme source d'information. Parmi celles-ci, deux d'entre elles s'enrichiront au fur et à mesure que la méthode sera utilisée : la base de données des fonctions associées aux produits et la base de données des raisons de la fin de vie. Ceci est principalement dû au fait que la méthodologie proposée peut être appliquée à différents produits provenant de milieux variés, ils pourront donc évoluer pour mieux répondre aux exigences de conception. C'est donc un modèle qui évoluera grâce aux diverses applications de celui-ci à des produits mécatroniques. Six processus permettront d'atteindre la tâche à réaliser, soit de déterminer une fin de vie pour chaque module et par le fait même, suggérer une fin de vie pour le produit en entier.

Pour faire usage de la méthode, le concepteur devra disposer au moins de la vue éclatée du produit et ses spécifications ou au mieux de la maquette numérique complète de celui-ci. Sans quoi, il devra bien connaître le fonctionnement et les caractéristiques du produit pour utiliser le modèle.

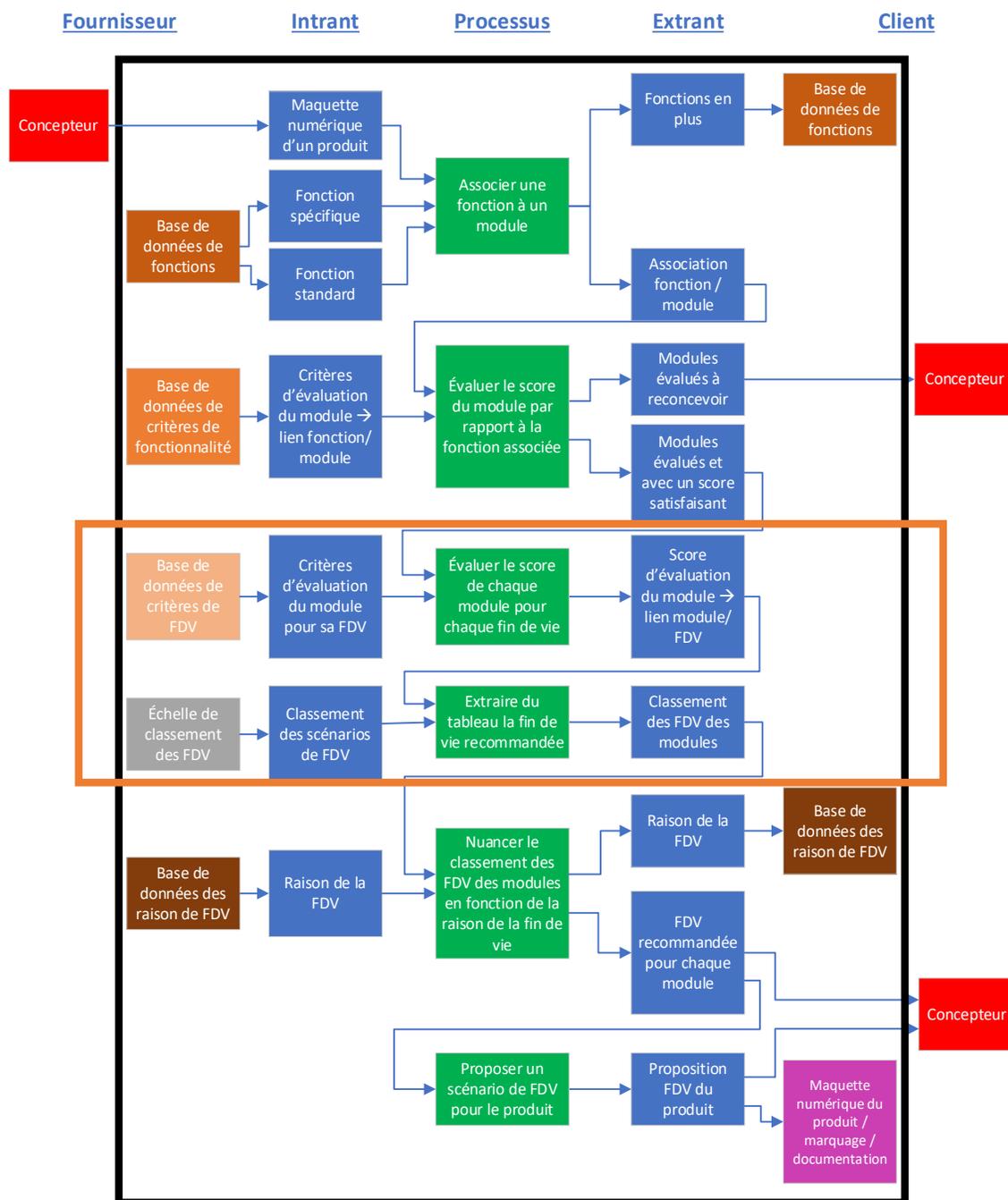


Figure 4.1 Méthode globale de conception

Légende :

Rouge : Intervention d'acteur extérieur

Teintes d'orange : Bases de données

Gris : Référence externe au processus

Bleu : Intrants et extrants du système

Vert : Processus

Rose : Sortie du processus, objectif de la méthode et stockage de l'information.

La première étape de conception sera d'associer chacun de modules aux fonctions du produit. Comme mentionné plus haut, pour une modélisation modulaire pure, il faut qu'un module réponde à une seule fonction. Une base de données de fonctions standards de produits mécatroniques serait disponible pour faciliter le travail du concepteur. Celle-ci aura été établie à la suite d'études de cas de produits provenant de différentes familles et d'associations entre ceux-ci.

Des fonctions spécifiques peuvent aussi être réalisées par le système et celles-ci peuvent varier d'un produit à un autre, être communes à une famille de produits ou bien être uniques. Pour effectuer cette étape, il faudra que le concepteur ait une bonne compréhension du système étudié pour effectuer l'association au mieux de ses connaissances. Le niveau de décomposition de l'objet devrait être en accord avec la complexité de ses systèmes et la taille du produit.

Ensuite, il faudra déterminer si l'association effectuée à l'étape précédente est adéquate pour que chaque module réponde bien à une fonction précise ou si elle a besoin d'être révisée. Pour ce faire, des critères d'analyse seront fournis pour les fonctions standards à évaluer. Si le score n'est pas satisfaisant, une reconception du module ou une ségrégation différente des éléments du produit devra être effectuée. Cela va nécessiter une expertise particulière de conception pour le produit en question.

Quand tous les modules sont convenablement formés, l'étape d'évaluation des scénarios de fin de vie peut débuter. Une liste définie de critères pour chacune des options sera appliquée à chaque module de l'objet étudié. Un score en résultera, pour chaque module, et sera étudié à l'étape suivante.

En fonction du score obtenu pour chaque fin de vie proposée, ce sera celle ayant le plus haut score et le moins grand impact environnemental qui sera sélectionnée et recommandée pour le module en question.

La raison de la fin de vie peut être un facteur influent sur la fin de vie sélectionnée, puisqu'un produit qui n'a pas atteint sa fin de vie mécanique utile pourrait être considéré comme désuet par son utilisateur. Cependant, plusieurs modules le composant pourraient toujours être fonctionnels. Cette étape nécessite une part de jugement de l'utilisateur de la méthode, surtout que cette évaluation est effectuée durant des étapes préliminaires de conception.

Finalement, une étape de proposition de scénario de fin de vie globale pour le produit s'ajoute au processus, pour avoir une vision d'ensemble des propositions, qui sera un regroupement et une évaluation des suggestions pour chacun des modules.

### 4.1.3 Processus centraux de la méthode développée : l'outil de conception

Puisque cette stratégie de modélisation comporte plusieurs processus et plusieurs étapes, le choix d'un des processus était important à effectuer. L'élément central de la méthode est la détermination de la fin de vie pour chacun des modules, soit les processus présentés à la Figure 4.2. Ce sont ces deux éléments qui seront présentés en détail dans les prochaines parties. Cette approche comporte des éléments communs avec la conception pour le désassemblage, puisque les modules étudiés sont isolés du reste du produit avant de subir leur traitement de fin de vie.

Afin de faciliter la compréhension dans les prochaines parties, le terme Outil d'aide à la Conception Modulaire pour la Fin De Vie (OCMFDV) sera utilisé pour faire référence à ces deux processus dans les prochaines parties. Le terme méthode proposée correspondant au processus présenté à la Figure 4.1.

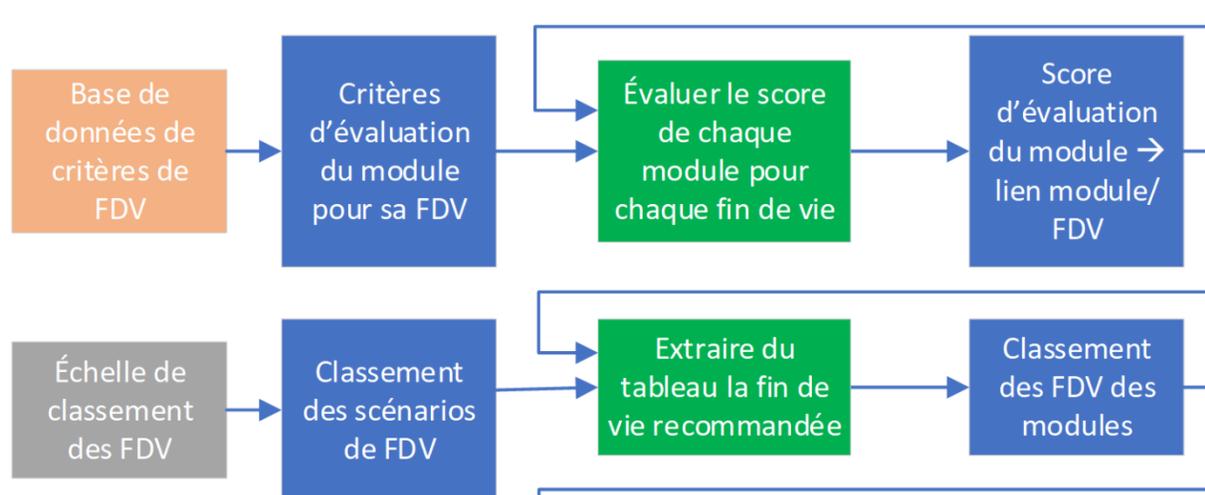


Figure 4.2 Processus de l'Outil d'aide à la Conception Modulaire pour la Fin De Vie, extrait de la Figure 4.1

#### 4.1.4 Étapes préliminaires

Comme décrit plus tôt, l'OCMFDV s'inscrit dans une plus grande approche de conception de produits; l'utilisateur a donc besoin d'informations préalables pour avoir toutes les notions pour l'utiliser efficacement.

L'élément central de la méthode est le produit qui sera conçu. Une bonne compréhension de celui-ci est primordiale. Comme mentionné plus haut, le concepteur pourra avoir différentes compétences relatives au produit. Idéalement, cette personne pourra avoir soit des compétences en conception de produits ou bien des connaissances du produit en question. De plus, de précieuses sources d'informations faciliteront leur travail, soit une description sommaire du produit, une vue éclatée et une liste des matériaux du produit. Sans ces informations, il sera plus difficile d'évaluer les critères proposés.

Comme mentionné dans la section précédente, les étapes en amont de celles de l'outil concernent l'association adéquate des modules du produit aux fonctions associées. L'entrée principale du processus est donc cette association. Le module en question pourra donc être évalué grâce aux critères issus de la base de données de critères de fin de vie. Les termes génériques sont issus des fonctions de base décrites par Little et Wood (Little et Wood, 1997).

Les fonctions considérées pour l'évaluation des modules associés sont les suivantes :

- Supporter les composants : Le module associé à cette fonction est l'élément sur lequel les autres pièces ou modules viendront se fixer;
- Protéger : Le module qui a cette fonction isolera les composants intérieurs du milieu extérieur;
- Commander le système : Les informations reçues seront traitées par ce module pour permettre le bon fonctionnement du produit;
- Interagir avec l'utilisateur et communiquer : Tous les éléments qui constituent l'interface utilisateur, comprenant par exemple des écrans et voyants lumineux;
- Acquérir l'information : Les dispositifs qui permettent de capter des informations internes ou externes au produit;

- Stocker la matière : Tout élément qui permet de conserver de la matière permet d'assurer cette fonction;
- Échanger de la matière avec le milieu extérieur : Les mécanismes qui permettent les échanges entre les milieux intérieurs et extérieurs;
- Convertir et entraîner : Toutes les pièces qui assurent la conversion et transmission de l'énergie pour faire bouger les éléments du produit;
- Stocker l'énergie et alimenter le système : Les composants qui emmagasinent et distribuent l'énergie, peu importe sa nature, aux composants du système.

Finalement, la dernière entrée du processus est l'échelle de classement des scénarios de fin de vie qui permet d'ordonner les scénarios de fin de vie en fonction de leur impact environnemental, afin de privilégier celui qui en a le moins.

## **4.2 Développement de l'outil OCMFDV**

Le modèle proposé a pour élément central l'évaluation des modules en fonction des différentes fins de vie. Pour ce faire, plusieurs étapes sont nécessaires afin de proposer un outil adapté aux contraintes de conception de produits. Sommairement, il faut sélectionner le mode d'évaluation qui sera appliqué, rassembler des critères de conception existants pour ensuite sélectionner les plus pertinents pour le contexte.

L'échelle de classement des scénarios de fin de vie sera utilisée telle quelle, puisqu'elle ne demande aucune intervention de la part du concepteur.

### **4.2.1 Sélection du mode de fonctionnement**

La méthodologie employée pour déterminer le scénario de fin de vie se doit d'être rigoureuse et s'appuyer sur des critères principalement issus de la littérature. Comme une proposition sera faite à l'issue du processus, il est primordial d'utiliser un outil d'aide à la décision. Plusieurs de ces procédés sont utilisés dans une multitude de secteurs, ainsi que dans le secteur de la conception. Il était important d'avoir un modèle simple à utiliser puisque c'était un des objectifs principaux du projet de recherche. Des méthodologies existantes, deux semblaient plus appropriées pour le but visé, soit les méthodes utilisant un arbre de décision ou des matrices de prise de décision.

Un arbre de décision permet une représentation visuelle efficace du raisonnement permettant d'aboutir à une solution finale. Une série de nœuds présentant les décisions à prendre s'enchaîne et cet outil est facile à utiliser. Cependant, une fois engagé dans un chemin, une bonne partie des scénarios ne sont plus accessibles. Aussi, lorsque plus que trois possibilités par nœud sont possibles, cela encombre rapidement la représentation visuelle.

L'utilisation d'une matrice de prise de décision est moins visuelle, mais elle permet de ne pas éliminer une option trop rapidement dans le processus. Celle-ci permet aussi de prendre en considération une quantité plus importante de critères et différentes combinaisons de choix effectués peuvent mener plus facilement à la même solution finale.

Comme certaines options de fin de vies sont à privilégier d'un point de vue environnemental, il est avantageux de pouvoir les atteindre par le plus de combinaisons possibles. C'est pourquoi la matrice de prise de décisions est le moyen retenu pour effectuer le choix de scénario de fin de vie. Ce sera donc le score total des critères qui sera utilisé pour comparer.

Le mode de fonctionnement étant déterminé, la prochaine étape consiste à sélectionner les critères du produit qui auront de l'importance pour chacune des fins de vie possibles.

#### **4.2.2 Critères de conception existants pour ELDA**

Les critères sur lesquels les décisions seront prises sont réellement au cœur de l'outil. Comme les priorités de conception dépendent de la fin de vie associée, des critères spécifiques concernant les caractéristiques des produits devront être établis pour chacun des scénarios. Ce sera la comparaison des scores des fins de vie pour chacun des modules qui permettra d'aboutir à la recommandation finale.

Bien sûr, des recherches ont été menées à ce sujet et des caractéristiques d'importance de produits mécaniques ont été identifiées. Un des travaux les plus importants est mené à l'Université de Stanford depuis 1997, les objectifs étant de :

- Déterminer le scénario de fin de vie d'un produit dès les premières étapes de conception;
- Fournir des bases techniques pour aider les concepteurs de nouveaux produits ou les développeurs de nouvelles solutions de traitement de fin de vie à communiquer efficacement avec acteurs ayant peu de connaissances sur le domaine;

- Intégrer la conception pour l'environnement dans le cycle de vie des produits et dans les décisions d'affaires. (C. M. Rose et al., 2000)

Comme mentionné plus tôt, ces objectifs recoupent ceux visés ici, cependant la conception du produit reste à l'échelle du produit et non des modules. Une certaine latitude des critères d'importance est donc à prendre en compte puisque les priorités ne sont pas tout à fait les mêmes.

Le nombre de critères retenus a bien sûr évolué depuis les premières étapes de leur recherche, passant de 24 critères au départ, à 12 critères, puis 6 présentés pour la méthode finale. Pour permettre de prendre en considération un bassin raisonnable de critères, ce sont les 12 critères sélectionnés en 1998 pour la méthode End-of-Life Design Advisor (ELDA) qui formeront l'échantillon de départ (Catherine Michelle Rose, 2000). Une traduction libre des termes utilisés a été effectuée.

**Critères existants** (Catherine Michelle Rose, 2000).

Durée de vie utile (wear-out life) : La durée au bout de laquelle le produit ne répond plus à la fonction pour laquelle il a été conçu, soit pour une raison technologique ou à la suite d'un bris des pièces.

Cycle de conception (design cycle) : La durée entre deux générations de produits ou l'intervalle de temps entre la mise en marché d'un produit et celui qui le remplacera, correspondant donc à la phase d'utilisation de celui-ci.

Cycle technologique (technology cycle) : La durée avant que la technologie utilisée par le produit soit dépassée sur le marché.

Raison de la fin de vie (reason for obsolescence) : La raison pour laquelle le produit ne sera plus utilisé par l'utilisateur pour réaliser sa fonction initiale. Les deux raisons principales étant que le produit a subi un bris mécanique ou qu'il ne répond plus assez bien aux exigences de l'utilisateur. Ce critère est aussi relié à la possible obsolescence programmée du produit.

Complexité fonctionnelle (functional complexity) : La relation entre les fonctions et les modules associés, l'association parfaite est de 1 module pour 1 fonction, mais dans certains cas, un module pourrait répondre à plusieurs fonctions, ce qui augmenterait sa complexité fonctionnelle.

Taille (size) : La taille du produit en entier, mais aussi de ses différents composants.

Nombre de pièces (number of parts) : Le nombre de pièces constituant le produit, une clarification doit être faite pour déterminer si les petites pièces et les attachements sont considérés dans le compte total ou non inclus.

Propreté du produit (cleanliness of product) : Relié à l'utilisation qui en a été faite, exprime la quantité de saleté sur le produit et donc la quantité de préparation nécessaire pour réutiliser ou fabriquer un nouveau produit à partir de l'initial.

Nombre de matériaux (number of materials) : Le nombre de matériaux constituant le produit, toutes pièces et modules confondus. Ce qui aura une importance pour le recyclage, relié à la compatibilité des matériaux et de la contamination possible des matières récupérées.

Nombre de modules (number of modules) : Le nombre de modules constituant le produit étudié

Risques (Hazards) : Les amendes ou coûts associés au mauvais traitement en fin de vie des pièces et des matériaux qui pourraient avoir des impacts néfastes sur les humains ou les écosystèmes.

### **4.2.3 Analyse des critères du modèle ELDA**

L'ensemble des caractéristiques de produits présenté précédemment fournit un cadre pour la sélection des critères pertinents pour l'Outil d'aide à la Conception Modulaire pour la Fin De Vie (OCMFDV) proposé. Une sélection stratégique doit être effectuée pour cerner au mieux l'objectif. Une analyse des critères existants sera la première étape à effectuer, sachant qu'il faudra sélectionner les plus pertinents concernant spécifiquement les modules.

Durée de vie utile (wear-out life) : Ceci est important à prendre en compte pour la conception de produits, en revanche celle-ci est complexe à prédire pour l'ensemble d'un produit, donc plus difficile à prévoir pour chacun des modules. Cette caractéristique est aussi appelée garantie de vie utile.

Cycle de conception (design cycle) : Cette caractéristique influencera la qualité des pièces récupérées en fin de vie utile du produit. Encore une fois, la prédiction de ce critère n'est pas facile à estimer concernant les modules, surtout en phase de conception. Cependant, des données existent pour des produits antérieurs à celui étudié ou à des produits similaires, facilitant le travail.

Cycle technologique (technology cycle) : L'évolution de la technologie de pointe d'un marché n'est pas un élément sur lequel un concepteur ou une compagnie a le contrôle. Dépendamment du secteur et des données disponibles, cet élément pourrait être difficile à établir.

Raison de la fin de vie (reason for obsolescence) : Caractéristique qui donne une bonne indication de la qualité des pièces récupérées; par exemple si le produit ne fonctionne plus à la suite d'un bris mécanique, certains modules ou sous assemblages auront besoin d'être remplacés, mais d'autres pourraient encore être en état de fonctionnement. S'il est mis de côté pour des raisons technologiques, ce même produit pourrait encore servir à un autre utilisateur après avoir effectué une inspection et un nettoyage des pièces. Ce critère est assez important pour déterminer la fin de vie appropriée pour les modules cependant, comme mentionné plus haut, prédire quand la technologie sera dépassée ne s'avère pas facile en phase de conception. Par contre, des données sur des composants électroniques similaires ou ceux utilisés sont disponibles et peuvent faciliter le travail.

Complexité fonctionnelle (functional complexity) : Pour l'outil proposé, le lien entre la fonction et le module associé devrait être 1 pour 1, tel que proposé dans les hypothèses du projet. Donc ce critère n'est pas essentiel pour la sélection de la fin de vie des modules.

Taille (size) : La taille du produit est intéressante à prendre en compte, elle peut influencer la facilité des opérations sur le produit en fin de vie. Un produit trop gros comme trop petit pourra engendrer des complications lors du traitement après la phase d'utilisation de celui-ci.

Nombre de pièces (number of parts) : La quantité de pièces est un critère à prendre en compte, puisqu'il a son importance lors du désassemblage, puisqu'une quantité importante de pièces augmentera la complexité des opérations ainsi que le temps nécessaire pour effectuer celles-ci.

Propreté du produit (cleanliness of product) : Cette caractéristique est importante puisque la quantité de saleté sur les pièces du produit influenceront sur le temps de traitement en fin de vie. Ceci aura une incidence sur le choix de scénario de fin de vie, puisque si le traitement proposé en fin de vie nécessite trop de ressources, ce critère aura son influence sur le choix entre, par exemple, la réutilisation ou la refabrication comme choix de fin de vie.

Nombre de matériaux (number of materials) : C'est un critère significatif pour les opérations de recyclage, cependant les quantités de ces matériaux sont aussi à prendre en compte. L'objectif du recyclage étant de toujours récupérer l'ensemble des matériaux avec un niveau de pureté le plus

élevé possible. Si ce n'est pas possible, il est toujours avantageux de les récupérer avec un niveau de pureté moins élevé tout en s'assurant qu'ils restent réutilisables et qu'ils présentent des propriétés intéressantes. La demande pour ces matériaux recyclés reste un enjeu majeur, puisque même si les matières sont récupérées, si les industries ne veulent pas s'en servir, cela remet en doute l'intérêt de les recycler.

Nombre de modules (number of modules) : Élément intéressant à mettre de l'avant, mais comme l'outil proposé traite déjà les modules séparément, ce n'est pas un critère à conserver.

Dangers (Hazards) : Les matériaux dangereux sont primordiaux à prendre en considération, puisqu'ils auront des répercussions négatives majeures sur l'environnement. Il est donc indispensable d'effectuer des recherches concernant les matériaux qui sont soumis à des réglementations et vérifier si ceux-ci sont des constituants du produit en question. Il sera important de les séparer du reste du produit pour mieux en effectuer le traitement.

Sur les caractéristiques mises de l'avant par l'ELDA, certaines se prêtent moins bien à une conception de produits modulaires ou sont plus difficilement déterminables dès la conception. Puisque l'OCMFDV se devra d'être facile à utiliser, les critères nécessitant une expertise pour l'évaluation seront écartés. Si la méthode avait été conçue pour un domaine particulier, il aurait peut-être été plus facile d'évaluer des produits selon les critères rejetés, mais dans le cas d'un outil global d'aide à la conception, un choix a dû être fait. D'après les critères énoncés plus haut, les caractéristiques qui seront conservées et qui serviront de cadre pour les prochaines étapes sont les suivants :

- La raison de la fin de vie;
- La taille;
- Le nombre de pièces;
- La propreté du produit;
- Le nombre de matériaux;
- Les dangers.

## 4.2.4 Sélection des critères en fonction des scénarios de fin de vie.

Comme mentionné plus haut, une sélection de critères spécifiques pour chaque scénario de fin de vie est logique, puisqu'ils ont chacun des caractéristiques ayant une importance plus grande. À partir de ces éléments prioritaires, trois critères ont émergé pour chaque scénario. Certains critères sont établis en fonction du produit en entier, mais en majorité, ceux-ci sont spécifiques au module en question. Un nombre de trois critères par scénario de fin de vie permettait d'avoir un bon aperçu des caractéristiques déterminantes pour celui-ci. Un nombre plus élevé présentait une redondance des points choisis.

### 4.2.4.1 Réutilisation

L'élément central pour la réutilisation de pièces est que celles-ci ne nécessitent pas une remise en état importante pour être utilisées à nouveau dans le produit d'origine. Des circonstances qui pourraient faciliter la réutilisation de modules et de pièces seraient un produit qui ne subit pas de changements de conception fréquents, les pièces pourraient donc rester dans la boucle d'utilisation pour une plus longue durée. Si les changements internes au produit sont fréquents et trop importants, il est plus difficile d'en réutiliser des parties. Il est considéré que les produits ont été récupérés en fin de vie. La logistique de transport est donc non considérée ici.

#### Critères retenus :

- Fréquence de changements de conception du produit : Un score élevé est attribué pour un produit qui a un cycle de vie plus long, puisque les pièces en question pourront être réutilisées pour plus longtemps.
- Nature du nettoyage nécessaire : Un score élevé correspond à un module nécessitant peu d'opérations de nettoyage. Un nettoyage nécessitant des ressources spécialisées obtiendra un score faible.
- État prédit du module en fin de vie : Un score élevé est attribué à un module qui ne subira pas de dommages lors de l'utilisation du produit. Les probabilités qu'un module se brise sont en fonction du type de module, de son importance au sein du produit et du possible contact avec le milieu extérieur.

#### 4.2.4.2 Refabrication

Comme mentionné plus haut, la refabrication consiste à assembler les pièces encore fonctionnelles d'un bassin de produits en fin de vie pour en assembler des nouveaux. Les modules qui se prêteront pour la refabrication devront donc avoir une bonne durée de vie et être utilisés dans une grande quantité de produits. Encore une fois, la logistique de récupération de ceux-ci n'est pas traitée.

##### Critères retenus :

- Quantité de produits similaires : Un score élevé permet d'identifier les produits très répandus dans la société. Une grande quantité d'items semblables permet d'évaluer la quantité de modules et de pièces disponibles en fin de vie pour refabriquer des produits identiques ou similaires.
- Proportion de pièces standard dans le module : Un score élevé correspond à un grand nombre de pièces standard dans le module. Un module très personnalisé aura peu de chances de s'intégrer dans un grand bassin de produits.
- Fréquence de remplacement du module : Un score élevé est attribué à un module dont la durée de vie est de beaucoup supérieure à la durée de vie du produit dans lequel il est intégré. Un élément qui est remplacé de façon régulière ne se qualifie pas pour la réutilisation ou la refabrication.

#### 4.2.4.3 Recyclage avec désassemblage

Le recyclage avec désassemblage est le scénario qui présente le moins grand impact environnemental pour les modules ou les produits qui ne peuvent être refabriqués ou réutilisés. Les différents constituants sont désassemblés pour permettre une récupération de matériaux les plus purs possibles.

##### Critères retenus :

- Quantité de matériaux de grande valeur : Un score élevé représente un module étant en grande partie constitué de matériaux de grande valeur, qu'il est très avantageux de récupérer avec un grand degré de pureté, donc sans contamination si possible. Une liste non exhaustive se trouve en Annexe A du document.

- Quantité de pièces dans le module (excluant les attaches) : Un score élevé est associé à un module comportant une quantité de pièces faible. Plus le module sera constitué de composants, plus les opérations de désassemblage seront importantes, nécessitant du temps, donc des ressources de la part des entreprises.
- Quantité d'outils nécessaires pour le désassemblage du module : Un score élevé correspond à une quantité d'outils nulle ou très faible pour extraire les pièces du module. Dans le même sens que le point précédent, une quantité importante d'outils requis pour le désassemblage engendrera plus de coûts pour l'entreprise et sera un élément déterminant sur la décision de désassembler ou non les produits avant le recyclage.

#### 4.2.4.4 Conception pour le recyclage sans désassemblage

Ce scénario est le dernier considéré puisqu'il est le dernier à permettre une récupération des matériaux pour les conserver dans la boucle de la réutilisation. Le module en entier sera donc broyé et tous les matériaux seront mêlés. Il faudra les trier par la suite, pour rassembler les matériaux similaires. Contrairement au point précédent, sans désassemblage, les matières récupérées sont en général plus contaminées, mais peuvent présenter des caractéristiques mécaniques intéressantes pour divers emplois.

#### Critères retenus :

- Facilité de tri des matériaux sans désassemblage : Un score élevé correspond à un faible nombre de matériaux différents, facilement séparables une fois broyés. Il y a beaucoup plus de risques de contamination lorsqu'un grand nombre de matériaux est utilisé au sein d'un même module. Ce n'est pas à privilégier pour une récupération efficace de la matière.
- Proportion de matériaux toxiques utilisés dans le module : Un score élevé est associé à une grande proportion de matière dangereuse constituant le module, qu'il faudra détourner de l'incinération, pour préserver la santé, les écosystèmes et l'environnement. Il existe des réglementations au niveau municipal, provincial et fédéral régissant ce type de pratiques, incluant des sanctions pour non-respect de celles-ci. Une liste de certains matériaux se trouve dans une annexe de la loi canadienne sur la protection de l'environnement (Canada, 2019). En Annexe B du document, une liste non exhaustive de matières toxiques ainsi que les éléments dans lesquels on les retrouve est présentée. Les données sont issues de la

European Environment Agency (Crowe, Elser, Göpfert, Mertins et Al., 2003), ainsi qu'un document des Nations Unies (Nations. et Affairs., 2011). Bien sûr, cette liste pourra être bonifiée suite à l'application de l'outil.

- Facilité d'élimination du revêtement sur les pièces : Un score élevé représente un module dont les pièces ne présentent aucun revêtement, élément qui nuit à la qualité des matières récupérées en fin de vie. La contamination des matières récupérées sera beaucoup plus importante si elles présentent un revêtement sur celles-ci (Hoffmann, Kopacek, Kopacek et Knoth, 2001) puisque même si le tri est bien effectué les matières récupérées pourraient être inutilisables.

#### **4.2.5 Mode d'évaluation des critères, pondération et présentation de l'outil**

Le mode de fonctionnement et les critères d'évaluation étant déterminés, il est temps de combiner ces éléments afin d'évaluer les scénarios de fin de vie pour chacun des modules. Les 12 critères, associés aux 4 scénarios de fin de vie étudiés permettront d'évaluer chacun des modules des produits étudiés pour en ressortir la fin de vie recommandée pour chacun. L'utilisation d'un tableau pour cette étape est la façon logique de procéder et cela facilitera l'analyse des données par la suite.

**Considération** : Les modules étudiés sont considérés comme étant déjà désassemblés et séparés des autres constituants du produit. Ils sont donc étudiés individuellement.

**Pondération** : Comme aucun critère n'a une plus grande importance par rapport aux autres, aucune pondération ne sera appliquée. Tous les éléments participeront donc au score total pour le mode à poids égal.

**Échelle d'évaluation** : Des échelles à 2 et 3 niveaux ont été testées pour l'évaluation, mais comme le choix s'effectue seulement entre 4 options, ces deux méthodes d'évaluation ne permettaient pas de faire une différence significative entre les scénarios. Une échelle à 5 échelons était donc plus appropriée et plus déterminante dans ce processus. Cela permet de mettre un choix neutre, si jamais le concepteur ne dispose pas d'assez d'informations pour évaluer ce critère.

**Présentation de l'outil** : La façon de présenter les critères pour l'évaluation devait être la plus intuitive possible afin d'en faciliter son utilisation par le concepteur. Pour une meilleure compréhension du mode d'évaluation par l'utilisateur, un ensemble d'icônes a été utilisé pour représenter les niveaux des échelles pour chaque critère.

L'outil regroupant tous ces éléments est disponible en Annexe C. Il a été conçu de la manière la plus visuelle possible pour encourager son utilisation.

**Mise en pratique :** Pour appliquer l'outil, il faudra évaluer chaque module selon les 12 critères présentés plus haut. Dans les tableaux de l'Annexe C, les lignes sont identifiées par des lettres (A, B, C) et les colonnes par des abréviations de scénarios de fin de vie (RE, RF, RD, RS). Par exemple, dans la Figure 4.3, pour le module qui répond à la fonction de supporter les composants, le score pour le premier critère (A) de réutilisation (RE), soit la quantité de produits similaires, est de 4. De même, toujours pour le même module, si l'on évalue le score du troisième critère (C) de refabrication (RF), soit la quantité d'outils nécessaires pour le désassemblage, on obtient le score de 5. En additionnant les 3 scores sur chacune des colonnes, on obtient un total pour chaque fin de vie. C'est ce total qui permettra de déterminer quel scénario de fin de vie sera recommandé.

		Supporter les composants			
		RE	RF	RD	RS
Évaluation des critères	A	4	4	1	5
	B	4	3	5	1
	C	5	5	5	5
		13	12	11	11

Figure 4.3 Mise en pratique de l'outil

## 4.2.6 Représentation des résultats

Les recommandations de scénarios de fin de vie étant spécifiques à chaque module, l'interprétation des résultats pourrait sembler complexe. C'est pourquoi une représentation visuelle semblait être la manière recommandée pour illustrer le classement des scénarios pour chaque module.

À partir des données dans un tableau Excel, la fonction graphique sparkline permet d'insérer rapidement une série de graphiques à partir des données fournies. Les graphiques se génèrent automatiquement et sont un bon outil visuel de représentation des résultats pour chaque module. Un exemple des graphiques générés à partir de l'évaluation des critères pour l'aspirateur automatisé est présenté dans la Figure 4.4. Des abréviations présentées au début du document correspondent aux 4 fins de vie possibles considérées pour les modules, soit la réutilisation, la refabrication, le recyclage avec désassemblage ou recyclage sans désassemblage.

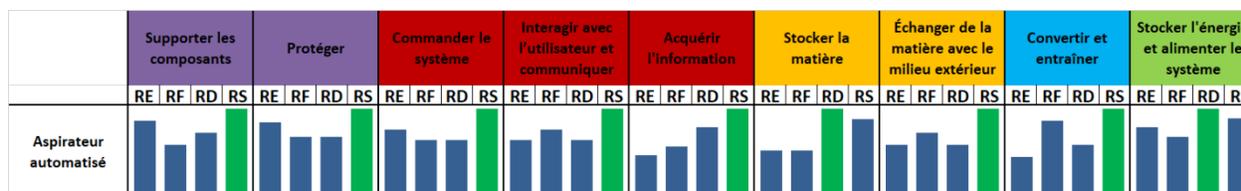


Figure 4.4 Exemple de graphiques représentant les résultats.

Le choix avec le score le plus élevé est représenté d'une couleur différente pour bien l'identifier. Dans le cas où deux scénarios différents obtiennent le score maximal pour un même module, le choix sera fait en fonction de l'échelle de classement des scénarios de fin de vie, qui préconise les scénarios qui ont l'impact le moins important sur l'environnement, soit la refabrication comme premier choix.

### 4.3 Application de l'OCMFDV

Le cadre de l'outil étant établi, il était indispensable de s'assurer que celui-ci puisse s'appliquer à un éventail de produits pour en déterminer leur fin de vie. Pour ce faire, il était important de cibler un nombre conséquent de produits ayant certaines similitudes, pour permettre d'effectuer la comparaison de ceux-ci. Pour mener à bien l'étude, des étapes préliminaires ont été réalisées pour les produits en question, afin d'obtenir la décomposition en modules. Les résultats de l'évaluation pour chacun des modules permettront d'effectuer des recommandations du scénario de fin de vie le plus approprié.

#### 4.3.1 Choix des produits étudiés

Les produits sélectionnés pour l'étude comprennent des composants mécaniques et de l'électronique. Ils proviennent de secteurs d'utilisations différents, mais tous relatifs à une utilisation quotidienne et se retrouvent en majorité chez un nombre conséquent de familles nord-américaines. Chacun de ces items a été sélectionné pour des raisons d'étude spécifique de leurs modules, mais aussi pour des fins de comparaison de ces produits avec d'autres examinés. Certains produits ont été démontés, mais en majorité ce sont les vues éclatées et les connaissances relatives sur ceux-ci qui ont été utilisées pour l'évaluation.

L'ensemble des produits étudiés sont présentés en Annexe E où, pour chacun, une description sommaire est établie, comprenant une photo et une vue éclatée pour en faciliter la compréhension. Cependant, pour certains produits, les vues éclatées ne correspondent pas exactement au produit présenté. Elles ne sont que présentées à titre de référence pour donner une idée sur les différents mécanismes internes. Les caractéristiques des produits, cependant, sont directement associées au produit présenté en photo. Ce sont des informations nécessaires pour appliquer l'outil, il est donc primordial de les avoir en sa possession.

Imprimante Laser Dell : Ce produit comporte une quantité importante de pièces tout en restant facilement démontable. De plus, les pièces qui la constituent sont une bonne combinaison d'éléments électriques et mécaniques. C'est un objet qui avait été étudié lors d'une étude précédente, donc la compréhension de son fonctionnement était facilitée.

Cafetière : La cafetière sélectionnée est un modèle de bas de gamme, qui ne comprend pas de capteurs, donc tout fonctionne à l'aide d'éléments mécaniques et électriques. La comparaison avec le presse-agrume dans la catégorie petit électroménager sera intéressante à faire. La fréquence d'utilisation de la cafetière est assez élevée, supposant une fréquence de remplacement ou de maintenance relativement élevée.

Presse-agrume automatisé : Le presse-agrumes étudié est composé de plusieurs pièces que l'utilisateur ne va pas manipuler, contrairement à la cafetière. Le modèle étudié est assez robuste et son utilisation est peu fréquente, en considérant qu'il est possédé par une famille moyenne.

Tondeuse à essence : La tondeuse a été sélectionnée puisque la source de son alimentation en énergie est l'essence et non l'électricité, comparativement à tous les autres produits. Il est intéressant d'étudier ce produit, pour ne pas tirer de conclusion pour une vaste gamme de produits mécaniques en ayant mis de côté différentes sources d'énergie.

Aspirateur standard : L'aspirateur sélectionné qui nécessite d'être branché à une prise électrique durant son utilisation. C'est un type d'appareil largement répandu, comprenant un fonctionnement de base, donc simple à comprendre. Il pourra être comparé à l'aspirateur automatisé, qui répond à la même fonction.

Aspirateur automatisé : L'aspirateur automatisé est utilisé pour aspirer la poussière sur le plancher, de manière autonome. Cet appareil utilise une batterie électrique rechargeable comme source d'alimentation. Les éléments mécaniques que l'utilisateur va manipuler en utilisation normale de l'appareil sont réduits, diminuant le risque de bris.

Lecteur CD portable : Un appareil qui tend à disparaître, mais qui présente un mécanisme intéressant. Les échanges des éléments mécaniques avec l'extérieur sont limités, seulement lors de l'insertion des CD à l'intérieur. Comme sa durée de vie technologique est faible, il sera remplacé assez rapidement.

Voiture téléguidée : Un jouet pour enfant qui est contrôlé à distance à l'aide d'une télécommande. Le modèle de voiture téléguidée en question est de basse qualité, impliquant que les pièces ont des durées de vies courtes et risquent de briser assez facilement, sans forcément être réparé pour prolonger sa durée de vie.

Bicyclette électrique : Le mécanisme du vélo étudié permet d'assister le pédalage de l'utilisateur pour faciliter ses déplacements. La bicyclette étant, au départ, un produit mécanique, ajouter les éléments électriques à celle-ci permet de rendre le produit plus complexe d'un point de vue technologique. De plus, c'est un appareil qui sera utilisé à l'extérieur, en contact avec un environnement plus imprévisible.

### **4.3.2 Étapes préliminaires**

Comme présenté pour la méthode globale, dans la section 4.1.2, les étapes préliminaires à l'OCMFDV proposé doivent être effectuées pour chaque produit avant de passer à l'étape d'évaluation. Une séparation de ceux-ci selon leurs modules respectifs ayant été effectuée, le résultat se retrouvent en Annexe D, en voici un exemple dans la Figure 4.5 pour l'imprimante.

	Supporter les composants	Protéger	Commander le système	Interagir avec l'utilisateur et communiquer	Acquérir l'information
	quoi support	quoi / de quoi moyen	quoi grâce à	qui/quoi moyen	éléments captés moyen
Imprimante	Les pièces/composantes	Composantes / extérieur	Système entier	Utilisateur / produit	Niveau de papier + bourrage
	Chassis	Coque extérieure	Circuits imprimés	Boutons + lumières + programme informatique	Capteurs

	Stocker la matière	Échanger de la matière avec le milieu extérieur	Convertir et entraîner	Stocker l'énergie et alimenter le système
	matière contenant	matière moyen	quoi moyen	type moyen
Imprimante	Papier + encre	Encre + papier	Dispositif d'impression	Electricité
	Bac à papier, sortie papier et cartouche d'encre	Dispositif d'impression	Moteur+ mécanisme d'entraînement	Cable d'alimentation électrique + protection + conversion

Figure 4.5 Exemple de séparation en modules

### 4.3.3 Matériel nécessaire

Pour utiliser l'OCMFDV, il est nécessaire d'avoir en sa possession :

- La description du produit ainsi qu'une ou plusieurs vues éclatées de celui-ci, comme les exemples en Annexe E. La maquette numérique est un avantage;
- Le tableau des critères des scénarios de fin de vie, disponible en Annexe C;
- La liste de certains matériaux de grande valeur, disponible en Annexe A;
- La liste de certains matériaux toxiques, disponible en Annexe B;
- Le fichier Excel Gabarit d'évaluation qui permet de générer les graphiques automatiquement.

### 4.3.4 Test de l'outil par un exemple connu (imprimante)

Pour un produit donné, l'imprimante laser, une étude a été faite pour déterminer si les critères élaborés permettaient d'obtenir des résultats satisfaisants par rapport aux attentes du concepteur ou, au contraire, des résultats éloignés des hypothèses. Il était important d'effectuer cette analyse avant de se lancer dans l'étude de plusieurs produits pour une utilisation judicieuse des ressources.

#### 4.3.4.1 Hypothèses de fin de vie pour chaque module de l'imprimante

Afin de déterminer si l'OCMFDV est pertinent et que les résultats proposés sont cohérents avec les scénarios de fin de vie envisagés, il est important de poser des hypothèses pour chaque module, de la fin de vie associée qui devrait être prônée. En voici un exemple pour l'imprimante, en Figure 4.6. Les couleurs violet et orange ont été utilisées pour effectuer un contraste avec le bleu et le vert utilisés pour la représentation des résultats.

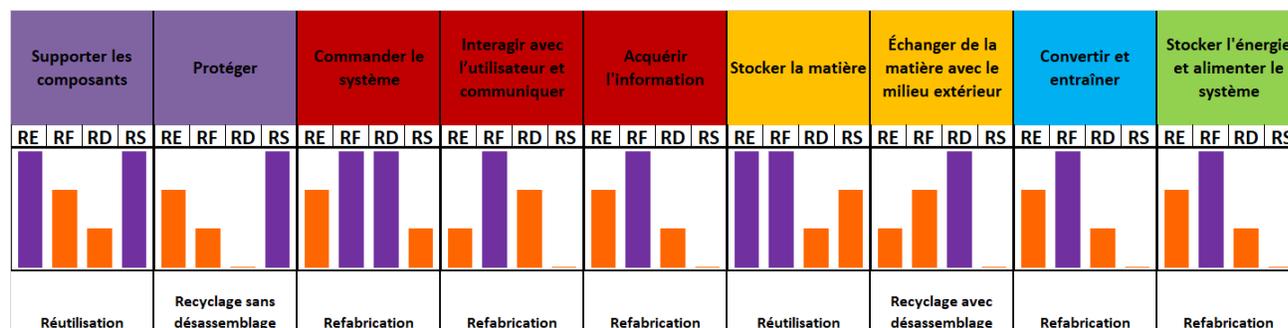


Figure 4.6 Hypothèse de scénario de fin de vie pour l'imprimante

#### 4.3.4.2 Comparaison des résultats avec les hypothèses.

Il est intéressant d'observer la comparaison des résultats obtenus pour l'imprimante, avec les hypothèses formulées pour chaque module. Ces hypothèses sont tirées de connaissances et d'observations lors du désassemblage de l'imprimante. Les résultats sont présentés dans la Figure 4.7. En violet et orange, les hypothèses tel que présenté dans la section précédente en violet et orange et en vert et bleu les résultats de l'OCMFDV. Cette analyse montre que l'hypothèse formulée et le résultat sont totalement en accord pour 6 modules sur 9, ce qui est un résultat assez significatif. Il est quand même important de porter attention aux modules pour lesquels les hypothèses ne sont pas validées.

Pour le module associé à la fonction *Commander le système*, l'hypothèse de refabrication avait été posée puisqu'une grande gamme d'imprimantes existe, utilisant des circuits imprimés similaires, donc l'intégrer dans un autre modèle d'imprimante semblait plus logique que de l'intégrer dans le même modèle. Surtout que ce n'est pas une pièce qui risque de subir des bris importants, comme elle n'est jamais manipulée par l'utilisateur lors d'une utilisation normale du produit. Le scénario de fin de vie refabrication obtenait le même score selon l'OCMFDV, mais selon l'échelle de classement des fins de vie, c'est la réutilisation qui l'emportait.

Pour les modules associés aux fonctions *Acquérir l'information* et *Échanger de la matière avec l'extérieur*, les hypothèses ne sont pas du tout validées. Les capteurs, qui sont associés à la fonction *Acquérir l'information* auraient avantage à être réutilisés dans des produits similaires pour les valoriser le mieux possible. Le score élevé pour le recyclage sans désassemblage est principalement dû au fait qu'il y a très rarement un revêtement sur les capteurs, ce qui entraîne les résultats vers ce scénario. Pour les systèmes qui échangent de la matière avec l'extérieur, ils sont très souvent constitués d'un nombre important de pièces, qui est un des critères évalués pour le recyclage avec désassemblage. Comme un nombre important de pièces est associé à un temps de démontage plus long, ce n'est pas le scénario qui est préconisé par l'OCMFDV.

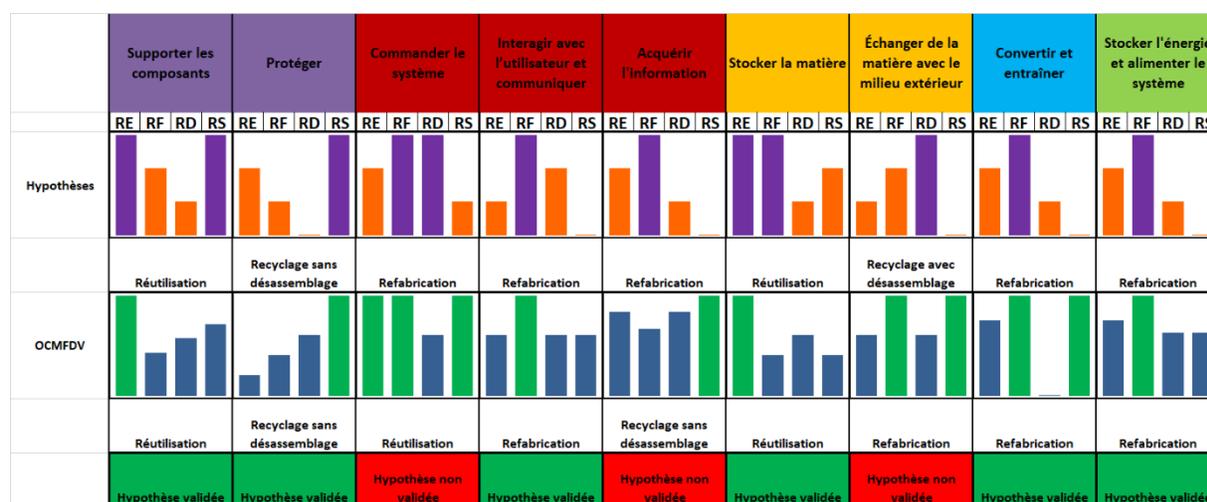


Figure 4.7 Validation des hypothèses pour l'imprimante

## 4.3.5 Présentation et analyse des résultats obtenus pour les 9 produits

### 4.3.5.1 Présentation des résultats

L'OCMFDV a été appliqué aux neuf produits présentés plus tôt et les résultats sont présentés en Annexe F.

La première chose qu'on peut remarquer est la présence de cases noires dans les tableaux, qui sont associées à certains produits lorsque le module en question n'est pas présent dans celui-ci. Par exemple, il n'y a aucun capteur dans la cafetière; ce ne sont que des éléments mécaniques qui assurent le bon fonctionnement de l'appareil; une case noire est donc présente pour la fonction *Acquérir l'information*. Pour le presse-agrumes, il ne présente aucun bouton ou interface de

communication entre l'utilisateur et l'appareil, donc encore une fois, présence d'une case noire pour le module qui répond à la fonction *Interagir avec l'utilisateur et communiquer*.

Ensuite, une grande quantité d'information se trouve dans le tableau. Chacun des modules ayant été analysés pour les 4 scénarios de fin de vie pour obtenir les scores présentés. Le premier tableau présente tous les scores en détail, le deuxième présente les graphiques des résultats, beaucoup plus lisibles. Le tout se retrouve dans l'Annexe F.

#### 4.3.5.2 Analyse selon les types de modules

Il est intéressant d'observer la tendance des recommandations de scénarios de fin de vie pour chacun des modules pour déterminer si une tendance se dessine. Pour ce faire, les scores pour les 9 produits ont été cumulés pour obtenir un graphique par module. Pour cette première analyse, les données brutes ont été utilisées. En ce sens que si 2 scénarios de fin de vies obtenaient le score le plus élevé pour le module d'un produit, les deux étaient conservés pour les résultats compilés. Par exemple, pour la fonction *Commander le système* de l'imprimante, 3 scénarios de fin de vie étaient proposés, ces 3 recommandations ont été incluent dans le tableau ci-contre. Les résultats sont observables dans la Figure 4.8.

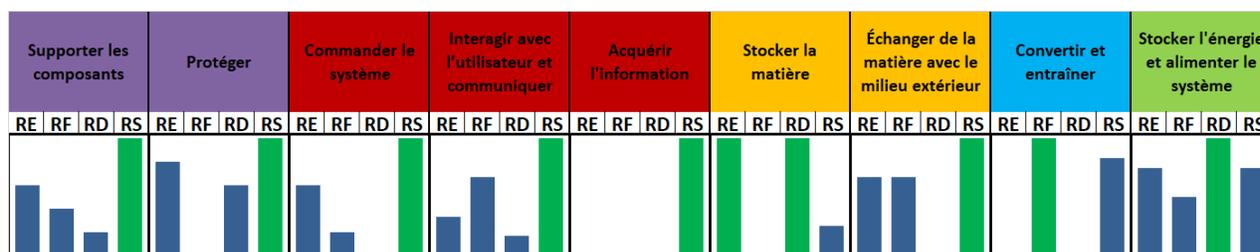


Figure 4.8 Résultats compilés par module de tous les produits étudiés, en conservant tous les scores les plus élevés

Bien que des généralités ne peuvent être tirées de ces résultats, on peut observer que la réutilisation est le scénario de fin de vie recommandé pour un seul module; stocker la matière. Aussi, une autre observation qui peut être faite est que pour 6 des 9 modules, c'est le Recyclage sans désassemblage qui est proposé comme fin de vie. Cela est dû au fait qu'il arrivait souvent que les modules obtenaient 2 ou 3 scénarios avec le score le plus élevé, incluant le recyclage sans désassemblage. Pourtant, selon l'échelle des scénarios de fin de vie, c'est celui qui est classé dernier d'un point de vue environnemental, ce n'est pas celui qui sera proposé pour le module en question.

Voilà pourquoi il est plus pertinent d'observer les résultats combinés en ne considérant que la recommandation pour chaque module de chaque produit. Toujours suivant le même exemple, pour l'imprimante et le module répondant à la fonction *Commander le système*, seule la recommandation de réutilisation a été conservée pour les résultats compilés. Les résultats sont observables dans la Figure 4.9.

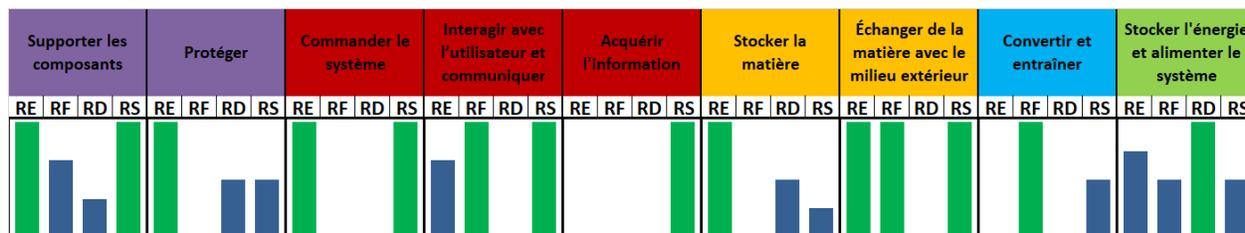


Figure 4.9 Résultats compilés par module, une recommandation par produit

Les résultats présentés ici représentent mieux les recommandations pour l'ensemble des modules des produits étudiés. On peut y voir que pour 5 modules présentés, la réutilisation est la recommandation de fin de vie proposée, ce qui est beaucoup plus encourageant. Le recyclage sans désassemblage est le scénario recommandé pour seulement un des modules, c'est un résultat très appréciable.

#### 4.3.5.3 Comparaison des produits présentant des similitudes

Il est intéressant de comparer des produits qui ont une certaine ressemblance pour observer les similitudes ou différences de résultats pour leurs modules respectifs.

##### Petits appareils de cuisine : cafetière et presse-agrumes automatisé

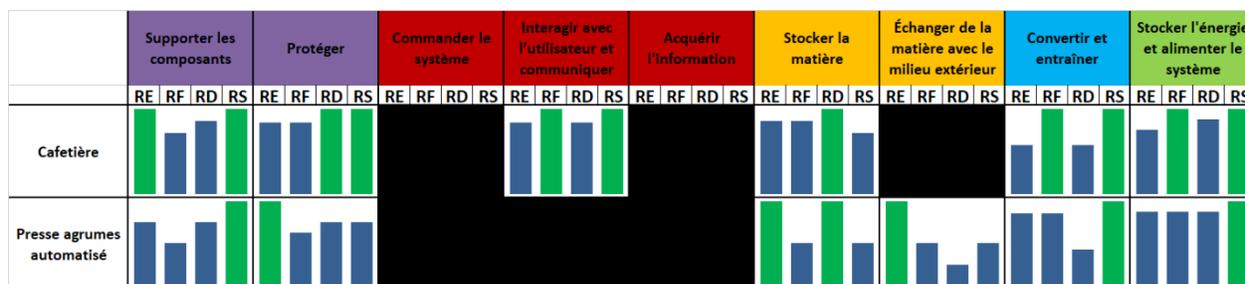


Figure 4.10 Comparaison petits appareils de cuisine

À la Figure 4.10, on peut observer une grande différence au niveau de la fonction *Supporter les composants*, principalement dû à la quantité de produits fabriqués; une cafetière est un objet plus

répandu qu'un presse-agrumes automatisé, donc son châssis pourrait plus facilement être réutilisé dans une cafetière du même modèle. Pour la fonction *Protéger*, comme la cafetière est utilisée en moyenne beaucoup plus fréquemment dans un ménage que le presse-agrumes, cela explique que la coque et ses pièces en général du presse-agrumes peuvent plus facilement être réutilisées puisqu'elles seront moins usées.

### Deux générations d'aspirateurs : Aspirateur standard et aspirateur automatisé

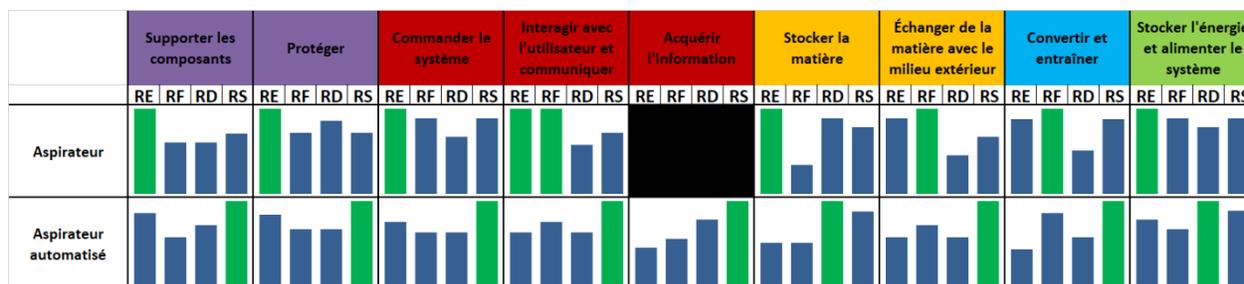


Figure 4.11 Comparaison de deux générations d'aspirateurs

Ce qui est très impressionnant de la Figure 4.11 est que pour l'aspirateur automatisé, la presque totalité des recommandations de fin de vie est le recyclage sans désassemblage. Ceci est principalement lié au fait que les changements de conception de celui-ci sont très fréquents, puisque c'est un objet plus technologique que l'aspirateur conventionnel puisqu'il comprend de l'électronique et des capteurs, ce qui élimine les options de réutilisation ou refabrication. Il n'est pas encore très répandu non plus, ce qui diminue son score pour la refabrication. Finalement, les pièces de l'aspirateur automatisé sont moins standard que son prédécesseur, donc la réutilisation des modules dans un autre modèle est plus limitée.

### Objets qui ont pour fonction principale de se déplacer : Voiture téléguidée et bicyclette électrique

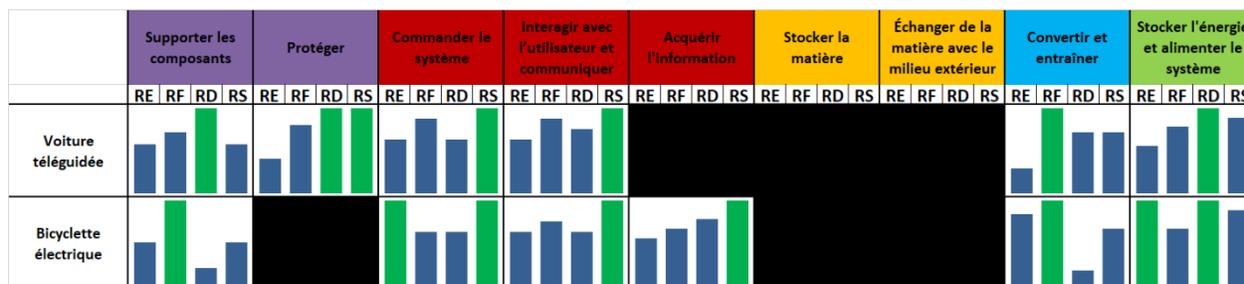


Figure 4.12 Objets qui se déplacent

Tout d'abord, ce sont deux produits qui n'ont pas du tout la même durée de vie. La voiture téléguidée est un objet qui est utilisé pour se divertir, parmi un bon nombre de jouets. La bicyclette électrique est utilisée comme moyen de transport, parfois même moyen de transport principal de son usager, donc la nécessité d'un produit durable, de bonne qualité est primordiale. Néanmoins, ce sont deux produits dont la fonction première est de se déplacer. Comme on peut l'observer dans la Figure 4.12, le recyclage est l'option de fin de vie la plus recommandée pour la voiture téléguidée, alors que c'est plutôt la réutilisation ou la refabrication pour la bicyclette électrique. Une grande différence est observable pour la fonction *Commander le système*; puisque le module de la bicyclette est de grande valeur et de bonne qualité, comme il est fabriqué pour un produit avec une longue durée de vie. Pour la voiture téléguidée, la qualité du produit n'est pas le critère principal de conception, donc les circuits électroniques sont d'une qualité largement inférieure à ceux de la bicyclette, voilà pourquoi c'est le recyclage sans désassemblage qui est recommandé. Il est beaucoup plus avantageux d'en récupérer les matières premières plutôt que le module en lui-même.

#### 4.4 Comparaison avec la décomposition du produit par modélisation fonctionnelle

Tel que présenté dans la section 2.3.2, le modèle de modélisation fonctionnelle propose une décomposition du produit selon des systèmes prédéterminés. L'association entre les fonctions établies pour l'OCMFDV et les systèmes proposés par le Prof Andreassen (Andreassen, Hansen et Cash, 2015) a été effectuée pour permettre une comparaison des résultats. Les résultats sont visibles dans la Figure 4.13. Sur la ligne du bas, les cinq systèmes de la conception fonctionnelle.

Supporter les composants	Protéger	Commander le système	Interagir avec l'utilisateur et communiquer	Acquérir l'information	Stocker la matière	Échanger de la matière avec le milieu extérieur	Convertir et entraîner	Stocker l'énergie et alimenter le système
Système d'armature		Système de contrôle			Système principal		Système de distribution et transmission d'énergie	Système de force motrice principale

Figure 4.13 Association des fonctions aux systèmes de la modélisation fonctionnelle

Le même travail de notation, grâce aux critères de l'OCMFDV, a été effectué pour ces systèmes, le résultat étant exposé en Annexe G du document. Il est intéressant de comparer les résultats pour déterminer si cette façon différente de décomposer le produit a une instance importante sur les scénarios proposés.

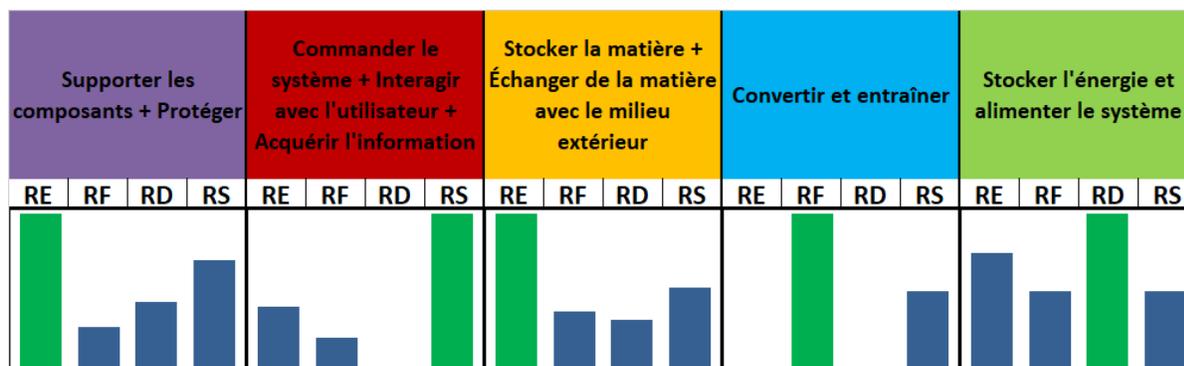


Figure 4.14 Résultat combinés du modèle proposé

La combinaison des résultats par type de fonctions a été effectuée et est présentée dans la Figure 4.14 pour permettre une comparaison plus aisée avec la décomposition en systèmes. Ce sont les données issues de la Figure 4.9 qui ont été utilisées pour générer les diagrammes.

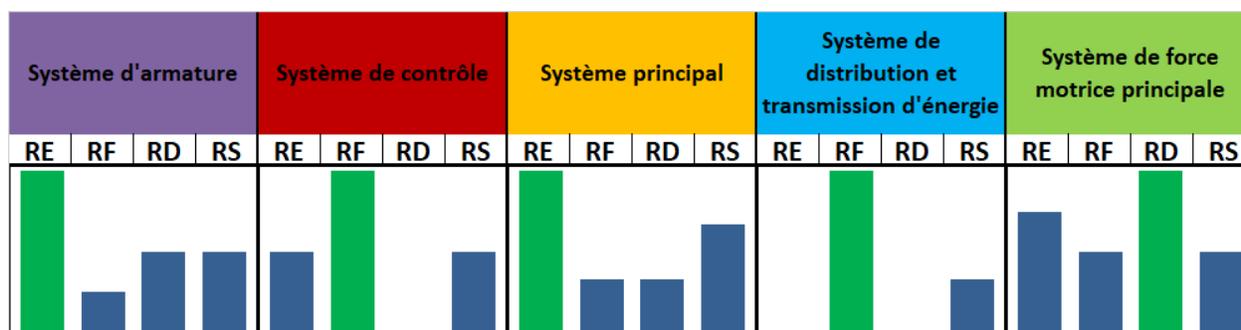


Figure 4.15 Résultats pour la décomposition en systèmes

La Figure 4.15 présente les résultats pour les neuf produits étudiés, suivant la décomposition en systèmes. Tout comme la figure précédente, ce ne sont que les premiers choix de scénarios qui sont considérés pour chaque produit.

La comparaison permettra de mettre en évidence si des critères ont une importance trop importante pour les différents modules ou si certaines recommandations doivent être faites pour certains scénarios de fin de vie.

Le système d'armature : Le système d'armature comprend à la fois la coque et le châssis pour une majorité de produits, ce qui pourrait entraîner une différence significative lorsque les deux sont combinés puisque le contact avec le milieu extérieur pourrait influencer sur la probabilité que le module se brise. Pourtant c'est la réutilisation qui est proposée dans les deux cas.

Le système de contrôle : Il comprend une partie de pièces à l'intérieur du produit, mais aussi les éléments qui vont permettre l'interaction de l'utilisateur avec celui-ci. En combinant ces modules selon ce système, il est constitué d'un grand nombre de pièces standard, ce qui peut expliquer que c'est la refabrication qui est mise de l'avant pour celui-ci.

Le système principal : Selon les deux décompositions, la fin de vie proposée est le recyclage avec désassemblage. Cela peut être dû au fait que les matériaux issus des câbles et des batteries des produits ont intérêt à être récupérés pour leurs matériaux. Des métaux purs composent ces modules, il est donc avantageux de récupérer les matériaux avec le meilleur degré de pureté.

La comparaison des deux systèmes était intéressante pour vérifier l'influence des regroupements différents sur les résultats, tel que présenté. Ce type de regroupements pourrait faciliter le travail du concepteur, puisque moins d'étapes sont nécessaires pour effectuer l'analyse, passant de 9 à 5 modules à évaluer. Une combinaison des 2 approches pourrait aussi être possible, si certaines des fonctions étaient réalisées par le même regroupement de pièces. Le fait d'avoir un choix de décomposition permet une plus grande flexibilité d'utilisation.

## CHAPITRE 5 ÉTUDE DE CAS

### 5.1 Présentation de l'étude

Pour permettre de tester l'outil avec des données existantes, il était primordial de trouver un produit sur lequel une conception pour la fin de vie a été effectuée pour permettre la comparaison des propositions. Pour rester dans le même genre de produits, le choix d'un appareil électronique domestique était approprié. Le produit sélectionné est une télévision Philips de 21 pouces, le modèle 21PT520A/00 sorti en 1994. Les télévisions, dans la large gamme des écrans LCD sont des produits très répandus et leur traitement en fin de vie est primordial à des fins environnementales. D'après l'étude reliée à l'ELDA (Catherine Michelle Rose, 2000), l'impact environnemental est de 89% plus élevé pour la mise en décharge d'une télévision par rapport à sa réutilisation. Ce sont aussi une source précieuse de matières premières accessibles et de bonne qualité. Les entreprises ont grand avantage à exploiter cette ressource.

Une étude de conception pour le désassemblage avait été réalisée en 1996 par une équipe de l'Université de Delft (Boks, Kroll, Brouwers et Stevels, 1996). Cependant, les scénarios de fin de vie qui avaient été considérés étaient le recyclage, l'incinération et l'enfouissement. Une autre étude a été réalisée sur la recyclabilité des produits par une équipe de l'Université d'Osaka (Fukushige, Mizuno, Kunii, Matsuyama et Umeda, 2013). Celle-ci présente une étude de cas d'une télévision LCD en Europe. Encore une fois, la réutilisation et la refabrication ne sont pas étudiées, mais le produit est séparé par composants avant d'étudier les fins de vie appropriées pour chaque matériau. Finalement une troisième étude traite du même produit pour étudier la possibilité d'améliorer l'utilisation des matériaux de la télévision (Ardente, Mathieux et Recchioni, 2013).

### 5.2 Données

Les données du produit en question sont disponibles dans l'Annexe H et proviennent des études de l'Université de Delft (Boks et al., 1996) et de Stanford (Catherine M. Rose, Ishii et Masui, 1998). Ce sont principalement des caractéristiques du produit qui permettront de faciliter l'évaluation des critères de l'OCMFDV.

L'association des fonctions aux modules a été effectuée et comme la télévision n'échange pas de matière avec l'extérieur et n'a pas vraiment de pièces mobiles, les fonctions respectives ne seront

pas étudiées. De même pour le module de capteurs, il y a absence de ce type de modules dans le produit. Le résultat de l'association se trouve dans le Tableau H.2 de l'Annexe H.

### 5.3 Hypothèses

Dans l'étude effectuée de l'Université de Stanford sur l'ELDA (Catherine Michelle Rose, 2000), des recommandations sont faites pour les produits en entier. La recommandation pour la fin de vie de la télévision par la méthode de l'ELDA était le **recyclage sans désassemblage**. C'est ce qu'on retrouve aussi dans le milieu industriel au moment de l'étude.

Dans ce document, il est aussi question d'une étude de Philips qui étudie ses produits sur le marché et les fins de vies recommandées de trois produits pourraient s'apparenter à la télévision étudiée. Le meilleur traitement en fin de vie aux Pays-Bas pour une télévision haut de gamme est la **réutilisation**, mais la recommandation de l'ELDA était le **recyclage avec désassemblage**. Pour un téléviseur conventionnel, les meilleures pratiques de traitement de fin de vie aux Pays-Bas sont le **recyclage avec désassemblage**; aussi ce qui est recommandé par la méthode. Finalement, pour un moniteur LCD, les meilleures pratiques de traitement en fin de vie aux Pays-Bas sont la **réutilisation des pièces** et la **refabrication** (Catherine Michelle Rose, 2000).

L'article de l'Université d'Osaka présente un modèle où le produit subit un désassemblage complet et les éléments sont traités séparément. Presque tous les composants sont recyclés. Ce qui correspond au **recyclage avec désassemblage** du produit. Les matières composant l'appareil sont classées en 4 catégories suivant leur type. La première catégorie comprend les matériaux qui nécessitent un traitement spécifique avant d'être recyclés, comme les circuits imprimés et l'éclairage « backlight ». Le type 2 comprend les pièces constituées d'un seul matériau, qui seront donc séparées du produit manuellement. Les pièces du 3<sup>e</sup> type seront broyées et triées mécaniquement par matériau. Donc ce sont les matériaux qui guident le traitement en fin de vie des pièces (Fukushige et al., 2013)

Dans l'étude pour la Commission européenne, les recommandations sont plutôt données par types de matériaux, ce qui est intéressant pour l'étude de cas, puisque les différents modules sont composés en majorité de matériaux différents; l'association des matériaux aux modules sera donc facilitée. D'après des entrevues effectuées de leur côté, toutes les pièces pourraient potentiellement être **réutilisées**, mais ne le sont pas pour des raisons économiques et techniques. D'un point de vue

environnemental, il est important de **recycler** toutes les grosses pièces de plastique, associées principalement à la coque dans l'OCMFDV. Pour les pièces électroniques constituées de matériaux toxiques, soit l'écran LCD, les circuits imprimés et la lampe cathodique, il est mentionné de les séparer du reste des composants pour les traiter séparément avant un potentiel déchiquetage des matières et un recyclage de celles-ci (Ardente et al., 2013).

## 5.4 Présentation et analyse des résultats

L'étude grâce à l'outil OCMFDV a été effectuée sur la télévision LCD pour déterminer quels scénarios de fin de vie sont proposés pour chaque module.

		Supporter les composants				Protéger				Commander le système				Interagir avec l'utilisateur et communiquer				Stocker l'énergie et alimenter le système			
		RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS
Évaluation des critères	A	4	4	1	5	4	4	2	5	4	4	5	2	4	4	4	3	4	4	2	4
	B	4	3	5	1	3	1	4	1	4	5	2	4	3	3	4	2	4	4	4	2
	C	5	5	5	5	2	3	4	2	3	4	2	5	3	3	3	3	4	3	4	4
		13	12	11	11	9	8	10	8	11	13	9	11	10	10	11	8	12	11	10	10
Recommandation																					
		Réutilisation				Recyclage avec désassemblage				Refabrication				Recyclage avec désassemblage				Réutilisation			

Figure 5.1 Résultats de l'étude de cas de la télévision LCD

La première observation qu'on peut faire est que le produit comporte 5 modules, tel que le présenté dans la description initiale du produit. La raison étant que la télévision ne répond pas à toutes les fonctions précédemment identifiées; comme convertir et entraîner par exemple.

La réutilisation est le scénario recommandé pour le module répondant à la fonction *Supporter les composants*, soit le châssis. Comme celui-ci est l'élément sur lequel les composants vont se fixer, le contact avec l'environnement extérieur est limité. Aussi, même si l'apparence du produit est modifiée, le châssis pourra rester le même pour une gamme de produits. Ce résultat est aussi cohérent avec les résultats obtenus pour les 9 produits étudiés.

La coque du produit est un élément qui est en contact constant avec le milieu extérieur et c'est ce module est en grande partie responsable de l'apparence du produit. Il doit rester attractif et

esthétique. Lors de la fin de vie du produit, surtout pour une télévision qui est conservée pour plusieurs années dans les ménages, il est très rare que l'apparence du produit n'a pas été modifiée avec les années. Il sera donc presque impossible de réutiliser ou refabriquer un produit avec ce même module. Le recyclage proposé est donc la meilleure option pour celui-ci.

La fonction *Commander le système* est assurée par un ou plusieurs circuits imprimés dans le produit. Dans une télévision, les fonctionnalités des modèles différents sont assez similaires, parfois la taille peut changer, mais les composants électroniques de base ne sont pas si différents d'un produit à un autre. L'option de fin de vie proposée est la refabrication, ce qui est cohérent avec le raisonnement de réutilisation du module dans un produit de la même famille. Cependant, la refabrication n'est pas une solution viable considérant la situation et le marché actuel, puisqu'il est difficile et coûteux pour les entreprises de récupérer leurs produits en fin de vie.

L'interface utilisateur ne comprend pas la télécommande ici, puisque l'étude porte sur le produit en tant qu'objet et non sur la phase d'utilisation de celui-ci. Celui-ci comprend donc les quelques boutons ainsi que l'écran. Comme l'écran en tant que tel est fait de matériaux toxiques, il est évident que le recyclage de celui-ci est nécessaire. De plus, comme mentionné dans les articles de l'équipe de l'Université d'Osaka et de la Commission européenne, les matériaux toxiques doivent être triés avant d'être recyclés. L'opération de désassemblage précédent le recyclage va en ce sens.

Finalement, l'alimentation du système en énergie se fait grâce à un cordon électrique et aux circuits internes. Contrairement à une imprimante, celui-ci n'est pas amovible donc non remplaçable facilement, cependant il est standard pour un grand nombre d'appareils électriques. Il pourra être réutilisé assez facilement dans un autre téléviseur, en gardant sa fonction propre.

Bien que la télévision ne comporte pas de pièces en mouvement, donc entraînées par un moteur, c'était un produit bien documenté pour la fin de vie dans la littérature. Les résultats obtenus sont cohérents avec un raisonnement de conception de produits. Le potentiel de récupération des matières constituant l'appareil est bien mis en valeur dans cette étude.

## CHAPITRE 6 DISCUSSION

### 6.1 Discussion sur l'outil proposée

L'objectif de la méthode était de pouvoir recommander un scénario de fin de vie dès les premières étapes de conception. L'outil proposé est facile d'utilisation et permet de structurer la conception en vue de la fin de vie. Il peut être appliqué à une gamme de produits mécaniques issus de différentes familles. Les critères de détermination pour chacun des scénarios de fin de vie ont été sélectionnés pour être assez facilement estimables dès la phase de conception et pourraient être déterminés dès l'élaboration du cahier des charges. Le matériel fourni pour la mettre en application facilite le travail de conception.

### 6.2 Retour sur les hypothèses simplificatrices

Des hypothèses ont été posées au départ pour concentrer le travail sur les aspects les plus pertinents de la conception. Celle-ci a certainement une influence sur les résultats, puisqu'aucun coût n'a été considéré et ce critère oriente souvent les décisions en entreprise. C'est une des raisons pour lesquelles les scénarios de fin de vie qui impliquent un nombre important d'opérations manuelles sont souvent écartés; comme le recyclage avec désassemblage, par exemple. Le recyclage sans désassemblage nécessitant donc moins de ressources.

En considérant les coûts des opérations, il y aurait sûrement une quantité plus importante de recommandations qui seraient le recyclage sans désassemblage, puisque cela implique le broyage des pièces et des sous-assemblages, puis le tri des matériaux. En revanche, les filières de recyclage actuelles ne sont pas bien adaptées et le circuit de récupération des matières comporte des lacunes. Il est intéressant de proposer des solutions pour récupérer un maximum de matériaux, mais il faut que la demande soit présente pour que tous ces efforts soient efficaces.

L'outil proposé implique aussi que les fins de vie proposées soient appliquées à chaque module individuellement. Comme les recommandations sont données pour les modules et non pour le produit, ceci implique des opérations de désassemblage. Même si une recommandation de fin de vie était donnée pour le produit en entier à partir de l'OCMFDV, celle-ci serait sûrement différente de celle proposée pour le produit en entier, puisque les spécificités de chaque module seraient peut-être noyées dans les caractéristiques générales de celui-ci.

L'hypothèse selon laquelle les produits sont en phase de maturité de leur cycle de vie implique que ce ne sont pas des produits qui viennent d'arriver sur le marché, donc l'indice de quantité de produits disponible, par exemple, est représentatif du moment où le produit était disponible et utilisé dans la population (principalement concernant le lecteur CD portatif). Ne pas poser cette hypothèse pourrait fausser les résultats de la quantité de produits disponibles.

Il est considéré que le concepteur dispose d'assez d'informations pour évaluer les scores de critères, et ce, dès la phase de conception. Sans cette hypothèse, les recommandations sont beaucoup moins viables. Une collecte d'informations en effectuant une étude plus élargie ou en posant des questions à des spécialistes du domaine permettrait d'obtenir les notions manquantes pour effectuer l'étude.

L'hypothèse établissant le lien direct entre les fonctions et les fins de vie du produit permet de traiter les associations fonction – module et module – fin de vie de façon linéaire. Cette association d'un module avec une fonction permet de respecter le principe de la conception modulaire pure. Si le produit ne répondait pas à cette association directe, une partie du produit pourrait être sujette à l'évaluation grâce à l'outil et un regroupement de fonctions pourrait être effectué pour mieux représenter le système en question. L'outil permet aussi de proposer des améliorations ou recommandations au produit en n'effectuant pas nécessairement de modifications aux composants existants.

## **6.3 Propositions de futurs travaux**

### **6.3.1 Former un bassin d'évaluateurs**

L'évaluation des critères de l'OCMFDV a été effectuée par une seule personne. Il serait bien de répéter le processus avec un nombre plus important d'évaluateurs afin d'obtenir un échantillon plus important de répondants, afin d'observer les différences de scores pour les produits étudiés. Ces différences pourraient n'avoir aucun impact sur les scénarios de fin de vie recommandés, mais pourraient aussi influencer sur le choix en fin de processus.

De plus, travailler avec un bassin d'évaluateurs permettrait d'identifier si certains critères ne sont pas assez bien définis ou moins facilement évaluables pour certains modules. Observer les concepteurs pendant qu'ils appliquent l'outil permettrait aussi de recueillir leurs commentaires

ainsi que leurs suggestions, ce qui pourrait éventuellement permettre d'ajouter des critères au besoin, pour le raffiner.

Enfin, disposer d'un bassin d'évaluateurs permettrait d'obtenir une incertitude sur les données en plus de regrouper des évaluations provenant de différents secteurs et phases de développement de produits.

### **6.3.2 Compléter la méthode de conception**

Comme présenté, l'OCMFDV n'est qu'une partie de la méthode de conception de produits en vue de leur fin de vie. Le processus comprend des étapes préalables et un jugement qui peut être effectué à la suite des résultats pour les nuancer. Ce jugement permettrait d'inclure la raison de la fin de vie dans les critères d'importance; élément déjà présent dans la méthode de l'ELDA. Celui-ci influe sur la qualité des pièces récupérées en fin de vie du produit et permet d'envisager des scénarios de fin de vie différents.

Les étapes sur lesquelles il serait intéressant de s'attarder sont celles permettant l'association efficace des fonctions et des modules du produit; c'est-à-dire celles précédant l'OCMFDV. L'étape de vérification que le module réponde bien à la fonction à laquelle il est associé est essentielle pour avoir une décomposition efficace du produit.

Un guide comportant les grandes lignes du désassemblage des familles de produits électroniques pourrait être une bonne addition à la méthode, pour traiter efficacement les modules en fin de vie. Comme chaque entreprise a son mode de fonctionnement et ses priorités concernant la fabrication de ses produits, un guide interne à la compagnie serait peut-être plus pertinent et adapté à chaque situation.

### **6.3.3 Assurer la traçabilité de l'information**

Il est très intéressant de s'attarder à la fin de vie des modules et des produits dès leur conception, mais il est primordial d'accorder une importance à la transmission de celle-ci jusqu'à la fin de leur vie utile.

Le meilleur exemple de traçabilité de l'information de la phase de conception à la fin de vie concerne le domaine des plastiques. Ceux-ci sont marqués d'un numéro, correspondant au type de plastique constituant l'élément en question. Cette pratique est répandue à travers le monde, elle est

facile à comprendre et permet aux citoyens d'effectuer leur part dans le tri des matières résiduelles domestiques. Cette indication pourrait aussi permettre aussi aux concepteurs d'identifier les plastiques pour leur permettre de faire des choix éclairés afin de prioriser l'utilisation de matériaux semblables dans les différents modules et dans le produit en entier.

Un marquage similaire pourrait être effectué sur les pièces ou les modules d'un produit pour augmenter les chances qu'il se dirige vers la fin de vie déterminée pour celui-ci dès la conception. L'information qui serait disponible dans le cahier des charges ou dans une base de données est beaucoup moins accessible. Un marquage directement sur les pièces serait la façon la plus efficace de transmettre d'information.

### **6.3.4 Évaluer le marché et la demande des matières récupérées**

Un autre sujet d'intérêt lorsqu'il est question de recyclage des matériaux est relatif à la demande et au marché prêt à acheter ces matières récupérées. L'épuisement des ressources à travers le monde pousse les entreprises à se tourner vers les matériaux recyclés et récupérés comme matière première. Une grande quantité d'industries misent même sur leurs actions écoresponsables comme élément central de leurs campagnes de vente. Une demande dirigée vers certains matériaux, plus facilement réutilisables par exemple, pourrait certainement orienter le marché. Une étude plus poussée serait intéressante à faire pour permettre d'orienter les choix de conception d'une entreprise ou d'un secteur. La réglementation de la responsabilité des producteurs vise actuellement un bon nombre d'appareils électroniques; elle est mise à jour régulièrement pour y inclure plus de types de produits, ce qui est très encourageant. Cette réglementation a comme effet que tous les compétiteurs se retrouvent dans la même situation et les force à développer de nouvelles politiques et de les appliquer. Sans celle-ci, la grande majorité des entreprises vont au moins cher. Des efforts doivent donc continuer d'être mis dans cette voie, pour assurer l'implantation de ces pratiques.

## CHAPITRE 7 CONCLUSION

L'objectif du projet de recherche était de développer un outil pour faciliter la diminution de l'impact de la fin de vie des produits modulaires sur l'environnement. La méthode de conception générale devait permettre de déterminer la fin de vie de modules d'un produit dès les premières phases de conception. Les critères devaient donc être facilement évaluables par le concepteur, ne connaissant pas l'état exact du produit en fin de vie. Une sélection de quatre scénarios de fin de vie a été effectuée pour permettre de concentrer les travaux sur ceux qui présentaient l'impact le moins grand sur l'environnement afin de les encourager. Les produits complexes pouvant comporter un grand nombre de modules, il était important de proposer un outil simple et systématique, ce qui est son originalité. Celle-ci permet donc l'évaluation de modules d'un produit pour en déterminer quelle fin de vie spécifique sera recommandée pour ceux-ci. La méthode de l'ELDA (Catherine Michelle Rose, 2000) est robuste et efficace, mais ne concerne que le produit dans son ensemble. L'association des fonctions d'un produit aux modules respectifs permet d'assurer une cohérence complète entre la conception et le produit développé. De plus, la proposition de fin de vie par module permet une plus grande flexibilité de traitements et tend vers une récupération de matériaux les moins contaminés possibles.

Bien que l'OCMFDV ait été appliqué à une gamme de produits et des milieux d'utilisation différents, avec des durées de vies multiples et un nombre de pièces variable, il est trop tôt pour effectuer une généralisation de ces résultats à l'ensemble des produits mécaniques. Il faudrait effectuer une étude plus poussée, avec un plus large nombre d'évaluateurs et une quantité plus importante de produits pour arriver à une généralisation de la fin de vie appropriée pour chaque type de modules. De plus, les produits étudiés se limitent à une utilisation personnelle, des objets de plus grande envergure et issus de domaines spécialisés n'ont pas été étudiés, il faudrait donc effectuer plus d'évaluations pour déterminer si l'outil est toujours efficace pour ces secteurs. Finalement, ce ne sont que 12 critères qui ont été retenus pour l'évaluation. Augmenter cette quantité permettrait d'obtenir une plus grande différenciation entre les résultats pour chacun des modules, mais rendrait le travail plus fastidieux. Les notions économiques des solutions de fin de vie n'ont pas été considérées, pourtant cet apport du marché pourrait être intégré dans les critères de conception pour avoir une approche plus réaliste de la situation. Néanmoins, les notions environnementales doivent rester la priorité, malgré la grande influence des notions économiques. Le but étant d'émettre des recommandations de conception pour les produits fabriqués.

## RÉFÉRENCES

- 24-carats.fr. (2015). Métaux précieux : liste et propriétés des métaux précieux. Repéré 8 juin 2020, à <http://www.24-carats.fr/metaux-precieux.html>
- Agard, B. (2002). *Contribution à une méthodologie de conception de produits à forte diversité* (Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG). Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00007637/>
- Andreasen, M. M., Hansen, C. T. et Cash, P. (2015). *Conceptual Design : Interpretations, Mindset and Models*. Cham, SWITZERLAND : Springer. Repéré à <http://ebookcentral.proquest.com/lib/polymtl-ebooks/detail.action?docID=3567601>
- Ardente, F., Mathieux, F. et Recchioni, M. (2013). Combining Five Criteria to Identify Relevant Products Measures for Resource Efficiency of an Energy Using Product. Dans *Re-engineering Manufacturing for Sustainability* (p. 111-116).
- Baldwin, C. Y. et Clark, K. B. (1997). Managing in an Age of Modularity. *Harvard Business Review* 75, no. 5, 84–93.
- Bhander, G. S., Hauschild, M. et McAloone, T. (2003). Implementing Life Cycle Assessment in Product Development. *Environmental Progress*, 22(4), 255-267. doi:10.1002/ep.670220414
- Boks, C. B., Kroll, E., Brouwers, W. C. J. et Stevels, A. L. N. (1996). Disassembly modeling: two applications to a Philips 21" television set. *IEEE International Symposium on Electronics & the Environment*, 224-229. doi:10.1109/isee.1996.501882
- Brown, C. (2019). Why and how to employ the SIPOC model . *Journal of business continuity & emergency planning* . England . Repéré à [http://polymtl.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwIV1LS8QwEA6u4rIX8f2WXDxJpW3SRw4edFH0ogu7onhZ8iq74HYLrgf\\_vZOkrWV1RSmUktBC5psmk8nMfAiR8Nz35uaEKEyV8AMB600iMpIxyQPpw1INl6K2-H7vOey-sCsTZOIY2t9cFNPCZIdi-voxfmf3kfPsf7NAGwJs02n9AX38UGuAZFADuoAJw\\_5M](http://polymtl.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwIV1LS8QwEA6u4rIX8f2WXDxJpW3SRw4edFH0ogu7onhZ8iq74HYLrgf_vZOkrWV1RSmUktBC5psmk8nMfAiR8Nz35uaEKEyV8AMB600iMpIxyQPpw1INl6K2-H7vOey-sCsTZOIY2t9cFNPCZIdi-voxfmf3kfPsf7NAGwJs02n9AX38UGuAZFADuoAJw_5M)
- Canada, G. (1999). Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999) - Canada.ca. Repéré 1 juillet 2020, à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/registre-environnemental-loi-canadienne-protection/publications/loi->

canadienne-protection-environnement-1999.html

- Canada, G. (2014, 6 janvier). Gestion environnementale des déchets. Repéré 7 juillet 2020, à <https://www.csc-scc.gc.ca/politiques-et-lois/318-7-isd-fra.shtml#s7>
- Canada, G. (2019). Liste des substances toxiques : annexe 1 - Canada.ca. Repéré 13 juillet 2020, à <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/registre-environnemental-loi-canadienne-protection/listes-substances/toxiques/annexe-1.html>
- Chen, J. (2010). A general study of design for disassembly for electronic products. *2010 IEEE 11th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design, CAID and CD'2010, 1*, 544-549. doi:10.1109/CAIDCD.2010.5681290
- Chouinard, U., Pigosso, D. C. A., McAloone, T. C., Baron, L. et Achiche, S. (2019). Potential of circular economy implementation in the mechatronics industry: An exploratory research. *Journal of Cleaner Production*, 239. doi:10.1016/j.jclepro.2019.118014
- Crowe, D. M., Elser, D. A., Göpfert, B., Mertins, L. et Al., E. (2003). Waste from electrical and electronic equipment (WEEE) - quantities, dangerous substances and treatment methods. *European Environment Agency, 1*, 37.
- den Hollander, M., Bakker, C. A. et Hultink, E. (2017). Product Design in a Circular Economy: Development of a Typology of Key Concepts and Terms: Key Concepts and Terms for Circular Product Design. *Journal of Industrial Ecology*. doi:10.1111/jiec.12610
- Dong, Q. et Whitney, D. (2001). Designing a Requirement Driven Product Development Process, 4.
- Dowie, T. (1994). Green design. *World Class Design to Manufacture, 1*(4), 32-38. doi:10.1108/09642369210063045
- Eppinger, S. et Ulrich, K. (2012). *Product Design and Development Product Design and Development*.
- Équiterre. (2019). Consommation responsable - Pour des choix écologiques, équitables et solidaires. Repéré 28 mars 2019, à <https://equiterre.org/projet/consommation-responsable>
- Fairtrade Canada. (2019). Qu'est-ce que Fairtrade? Repéré 28 mars 2019, à <http://www.fairtrade.ca/fr-CA/Qu-est-ce-que-Fairtrade>

- Fukushige, S., Mizuno, T., Kunii, E., Matsuyama, Y. et Umeda, Y. (2013). Quantitative Design Modification for the Recyclability of Products. Dans *Re-engineering Manufacturing for Sustainability* (p. 27-33). doi:10.1007/978-981-4451-48-2
- Generation, B. (2018). Analyse de cycle de vie et éco-conception, des moyens de production plus durables | B2020 Generation. Repéré 17 mars 2020, à <http://www.beehave2030.fr/analyse-de-cycle-de-vie-et-éco-conception-des-moyens-de-production-plus-durables>
- Gu, P. et Sosale, S. (1999). Product modularization for life cycle engineering. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 15(5), 387-401. doi:10.1016/S0736-5845(99)00049-6
- Gupta, S. M. et Lambert, A. J. D. (Fred). (2004). *Disassembly Modeling for Assembly, Maintenance, Reuse and Recycling*. Baton Rouge, UNITED STATES : Taylor & Francis Group. Repéré à <http://ebookcentral.proquest.com/lib/polymtl-ebooks/detail.action?docID=2010217>
- Hoffmann, M., Kopacek, B., Kopacek, P. et Knoth, R. (2001). Design for re-use and disassembly. *Proceedings - 2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, 378-381. doi:10.1109/ECODIM.2001.992385
- Holmqvist, T. K. P. et Persson, M. L. (2003). Analysis and improvement of product modularization methods: Their ability to deal with complex products. *Systems Engineering*, 6(3), 195-209. doi:10.1002/sys.10046
- Huang, C. C. et Kusiak, A. (1998). Modularity in design of products and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A:Systems and Humans.*, 28(1), 66-77. doi:10.1109/3468.650323
- Huang, C. C., Liang, W. Y., Chuang, H. F. et Chang, Z. Y. (2012). A novel approach to product modularity and product disassembly with the consideration of 3R-abilities. *Computers and Industrial Engineering*, 62(1), 96-107. doi:10.1016/j.cie.2011.08.021
- Hubka, V. (1988). *Theory of technical systems : a total concept theory for engineering design / Vladimir Hubka, W. Ernst Eder* (édité par W. E. (Wolfgang E. Eder). Berlin ; New York : Springer-Verlag.
- Kimura, F., Kato, S., Hata, T. et Masuda, T. (2001). Product Modularization for Parts Reuse in Inverse Manufacturing. *CIRP Annals*, 50(1), 89-92. doi:https://doi.org/10.1016/S0007-

8506(07)62078-2

- Le Moigne, R. (2018). *L'économie circulaire : stratégie pour un monde durable* (2e édition). Malakoff : Dunod.
- Li, X., Zhao, W., Zheng, Y., Wang, R. et Wang, C. (2014). Innovative product design based on comprehensive customer requirements of different cognitive levels. *Scientific World Journal*, 2014. doi:10.1155/2014/627093
- Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology*, 22 140, 55.
- Little, A. D. et Wood, K. L. (1997). *Functional Analysis: A Fundamental Empirical Study for Reverse Engineering, Benchmarking, and Redesign*.
- Low, M. K., Williams, D. et Dixon, C. (1996). Choice of end-of-life product management strategy: a case study in alternative telephone concepts. *IEEE International Symposium on Electronics & the Environment*, 112-117. doi:10.1109/isee.1996.500408
- Masclé, C. et Xing, K. (2009). A liaison model for disassembly-reassembly product ecodesign. *International Journal of Design Engineering*, 2(3), 346. doi:10.1504/ijde.2009.030179
- Meerkamm, H. et Koch, M. (2005). Design for environment/recycling. Dans *Design Process Improvement* (p. 560). Repéré à <http://www.springer.com/engineering/mechanical+eng/book/978-1-85233-701-8>
- Mørkeberg Torry-Smith, J., Qamar, A., Achiche, S., Wikander, J., Henrik Mortensen, N. et During, C. (2012). Challenges in Designing Mechatronic Systems. *Journal of Mechanical Design*, 135(1). doi:10.1115/1.4007929
- Nations., U. et Affairs., D. of E. and S. (2011). *Consolidated list of products whose consumption and/or sale have been banned, withdrawn, severely restricted or not approved by governments.*, New York : UN.
- Pahl, G. et Beitz, W. (1995). *Engineering Design* (3rd editio). Berlin : Springer-Verlag.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. et Grote, K. H. (2007). *Engineering design: A systematic approach. 9.2 Modular Products*. doi:10.1007/978-1-84628-319-2
- Pimmler, T. U. et Eppinger, S. D. (1994). Integration Analysis of Product Descriptions. *Theory*

*and Methodology Conference Miieapolis, (September).*

Quebec, G. (2020). Q-2, r. 19 - Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles. Repéré 25 juin 2020, à <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2, r. 19>

Québec, P. (2018). Politique québécoise de gestion des matières résiduelles Loi sur la qualité de l'environnement (chapitre Q-2, a. 53.4). Repéré 3 novembre 2019, à <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/Q-2, r. 35.1/>

Quintus, F. (2007). *Les Enjeux De L ' Enfouissement Des Déchets : Quelle Place Aux Perceptions Des Risques Dans La Procédure Québécoise D ' Évaluation Environnementale*. Université Du Québec À Montréal.

Remery, M. (2011). *Nouvelle méthode d'évaluation des scénarios de fin de vie pour des produits en phase de conception préliminaire* (École Polytechnique De Montréal). Repéré à [https://publications.polymtl.ca/539/1/2011\\_MarieRemery.pdf](https://publications.polymtl.ca/539/1/2011_MarieRemery.pdf)

Remery, M., Mascle, C. et Agard, B. (2012). A new method for evaluating the best product end-of-life strategy during the early design phase. *Journal of Engineering Design*, 23(6), 419-441. doi:10.1080/09544828.2011.605061

Rose, C. M., Stevels, A. et Ishii, K. (2000). A new approach to end-of-life design advisor (ELDA). *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 99-104. doi:10.1109/isee.2000.857632

Rose, Catherine M. et Ishii, K. (1999). Product end-of-life strategy categorization design tool. *Journal of Electronics Manufacturing*, 9(1), 41-51. doi:10.1142/S0960313199000271

Rose, Catherine M., Ishii, K. et Masui, K. (1998). How product characteristics determine end-of-life strategies. *IEEE International Symposium on Electronics & the Environment*, 322-327. doi:10.1109/isee.1998.675079

Rose, Catherine Michelle. (2000). *Design for Environment : a Method for Formulating Product End-of-Life Strategies*. STANFORD UNIVERSITY.

Sauvé, S., Normandin, D. et Mcdonald, M. (2016). *L'économie circulaire: une transition incontournable*. Montréal : Presses de l'Université de Montréal. Repéré à [www.pum.umontreal.ca](http://www.pum.umontreal.ca)

- Seaver, W. B. (1994). Design considerations for remanufacturability, recyclability and reusability of user interface modules. Dans *Proceedings of 1994 IEEE International Symposium on Electronics and The Environment* (p. 241-245). doi:10.1109/ISEE.1994.337251
- Shetty, D. (2016). Product Design for Engineers. doi:10.1016/j.eprs.2012.12.006
- Stone, R. B. et Wood, K. L. (1999). Development of a Functional Basis for Design . *Journal of Mechanical Design*, 122(4), 359-370. doi:10.1115/1.1289637
- Stone, R. B., Wood, K. L. et Crawford, R. H. (2000). A heuristic method for identifying modules for product architectures. *Design Studies*, 21, 5-31. doi:10.1016/S0142-694X(99)00003-4
- Sumter, D., Bakker, C. A. et Balkenende, R. (2017). *The role of product designers in the transition towards the Circular Economy: A Reality Check*.
- Sy, M. et Mascle, C. (2011). Product design analysis based on life cycle features. *Journal of Engineering Design*, 22(6), 387-406. doi:10.1080/09544820903409899
- Ulrich, K. (1994). Fundamentals of Product Modularity. *Management of Design*, 219-231. doi:10.1007/978-94-011-1390-8\_12
- Van Beek, T. J., Erden, M. S. et Tomiyama, T. (2010). Modular design of mechatronic systems with function modeling. *Mechatronics*, 20(8), 850-863. doi:10.1016/j.mechatronics.2010.02.002
- World Commission on Environment and Development. (1987). *Our common future*. Oxford University Press.
- Yahiaoui, A. (2009). *Sur le choix des produits semi-finis dans un contexte de très forte diversité* (Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG). Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00414111>
- Yu, J., Williams, E. et Ju, M. (2009). Review and prospects of recycling methods for waste printed circuit boards. *2009 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, ISSST '09 in Cooperation with 2009 IEEE International Symposium on Technology and Society, ISTAS*. doi:10.1109/ISSST.2009.5156727

## RÉFÉRENCES DES FIGURES

- Amazon.com. (s.d.). Sony DEJ611 Portable CD Player - Silver (Discontinued by Manufacturer): Home Audio & Theater. Repéré 2 mars 2020, à <https://www.amazon.com/Sony-DEJ611-Portable-Player-Discontinued/dp/B000050FG7>
- BestBuy.ca. (s.d.). Aspirateur robot connecté Wi-Fi Roomba i7 d'iRobot (7150). Repéré 2 mars 2020, à <https://www.bestbuy.ca/fr-ca/produit/aspirateur-robot-connecte-wi-fi-roomba-i7-d-irobot-7150/12885840>
- Boks, C. B., Kroll, E., Brouwers, W. C. J. et Stevels, A. L. N. (1996). Disassembly modeling: two applications to a Philips 21" television set. *IEEE International Symposium on Electronics & the Environment*, 224-229. doi:10.1109/isee.1996.501882
- Boutique Courajoux. (2020). Turbo King - Voiture Téléguidée. Repéré 3 mars 2020, à <https://www.courajoux.com/turbo-king-voiture-teleguidee.html>
- Docplayer.fr. (s.d.). NOTICE EN FRANÇAIS. Repéré 3 mars 2020, à <https://docplayer.fr/5617618-Notice-en-francais-par.html>
- Eesi.e-monsite.com. (s.d.). Etude starter Robot Roomba. Repéré 2 mars 2020, à <http://eesi.e-monsite.com/pages/etudes-starter/etude-starter-robot-roomba.html>
- Esthergkim.com. (s.d.). Industrial Design - EK. Repéré 2 mars 2020, à <http://www.esthergkim.com/industrial-design.html>
- Freepik.com. (s.d.). Loading icons. Repéré 12 juillet 2020, à [https://www.freepik.com/free-vector/loading-icons\\_901192.htm](https://www.freepik.com/free-vector/loading-icons_901192.htm)
- Gardif. (s.d.). Vue éclatée - Tondeuse IDT 51 cm moteur honda gcv160 cl IDT 160H 51 4en1 TL. Repéré 28 février 2020, à <https://www.gardif.fr/index.php?page=produitvue&id=892>
- Gearbest.com. (2018). Bike Black Electric Bikes Sale, Price & Reviews. Repéré 18 mars 2020, à [https://www.gearbest.com/bikes/pp\\_434406.html](https://www.gearbest.com/bikes/pp_434406.html)

- iFixit. (2017). Vue éclatée du vélo pliant électrique Xiaomi MiJia QiCycle. Repéré 3 mars 2020, à <https://fr.ifixit.com/Tutoriel/Vue+éclatée+du+vélo+pliant+électrique+Xiaomi+MiJia+QiCycle/67654>
- LaBaie. (s.d.). Miele - Aspirateur Compact C1. Repéré 2 mars 2020, à <https://www.labaie.com/miele-aspirateur-compact-c1/product/0600088230471>
- Lbrty.com. (s.d.). Parts Diagram for LaserJet 4250, 4350. Repéré 28 février 2020, à [http://www.lbrty.com/diagrams/di\\_4250a.html](http://www.lbrty.com/diagrams/di_4250a.html)
- Mpsprinters.com. (s.d.). Dell 1100 Laser Printer (15 ppm) - 1100 Service manual. Repéré 2 mars 2020, à <https://www.mpsprinters.com/products/Dell-1100-laser-printer-15-ppm-1100.html>
- Nesridiscount.com. (s.d.). Presse agrume Classic SANTOS 11C. Repéré 28 février 2020, à <https://www.nesridiscount.com/presse-agrume-classic-santos-pa11c.html>
- Philips.co.in. (s.d.). Compare our TV |. Repéré 9 juin 2020, à <https://www.philips.co.in/c-m-so/tv/all#>
- Pixabay. (s.d.-a). Automobile Car Drive. Repéré 18 février 2020, à <https://pixabay.com/vectors/automobile-car-drive-porsche-1300239/>
- Pixabay. (s.d.-b). Bus Cars Icon. Repéré 18 février 2020, à <https://pixabay.com/vectors/bus-cars-icon-symbol-vehicle-1295804/>
- Pixabay. (s.d.-c). Carpenter Knife Tool. Repéré 26 février 2020, à <https://pixabay.com/vectors/carpenter-knife-tool-woodworker-148447/>
- Pixabay. (s.d.-d). Cleaning Brush Detergent. Repéré 5 février 2020, à <https://pixabay.com/vectors/cleaning-brush-detergent-bleach-3211149/>
- Pixabay. (s.d.-e). Climate Cloud Communications. Repéré 26 février 2020, à <https://pixabay.com/vectors/climate-cloud-communications-data-2099146/>
- Pixabay. (s.d.-f). Computer Desktop Workstation. Repéré 4 février 2020, à

<https://pixabay.com/vectors/computer-desktop-workstation-office-158675/>

Pixabay. (s.d.-g). Faucet Water Silhouette. Repéré 5 février 2020, à <https://pixabay.com/vectors/faucet-water-silhouette-blue-drip-1066626/>

Pixabay. (s.d.-h). Gear-Wheel Gearwheel Gear. Repéré 26 février 2020, à <https://pixabay.com/vectors/gear-wheel-gearwheel-gear-cogs-310906/>

Pixabay. (s.d.-i). Gear Mechanics Settings. Repéré 26 février 2020, à <https://pixabay.com/vectors/gear-mechanics-settings-icon-1119298/>

Pixabay. (s.d.-j). Hand Washing Cleaning. Repéré 5 février 2020, à <https://pixabay.com/vectors/hand-washing-cleaning-white-towel-4399971/>

Pixabay. (s.d.-k). Headphones Drawn Listening. Repéré 4 février 2020, à <https://pixabay.com/vectors/headphones-drawn-listening-headset-30583/>

Pixabay. (s.d.-l). Icon Shannon Television. Repéré 4 février 2020, à <https://pixabay.com/vectors/icon-shannon-television-tube-tv-1293234/>

Pixabay. (s.d.-m). Iphone 6S Smartphone. Repéré 4 février 2020, à <https://pixabay.com/illustrations/iphone-iphone-6s-smartphone-mobile-1936818/>

Pixabay. (s.d.-n). Lawn Mower Machine Grass. Repéré 18 février 2020, à <https://pixabay.com/vectors/lawn-mower-machine-grass-cut-lawn-30441/>

Pixabay. (s.d.-o). Screwdriver Settings Spanner. Repéré 26 février 2020, à <https://pixabay.com/vectors/screwdriver-settings-spanner-system-1294338/>

Pixabay. (s.d.-p). Tool Screwdriver. Repéré 26 février 2020, à <https://pixabay.com/vectors/tool-screwdriver-outlines-310291/>

Pixabay. (s.d.-q). Tools Carpentry Blue. Repéré 26 février 2020, à <https://pixabay.com/vectors/tools-carpentry-blue-silhouettes-155856/>

Pixabay. (s.d.-r). Tractor Field. Repéré 18 février 2020, à <https://pixabay.com/illustrations/tractor-field-agriculture-1918557/>

Pixabay. (2013). Gold Bar Bullion. Repéré 26 février 2020, à <https://pixabay.com/vectors/gold-bar-bullion-gold-bullion-146539/>

Pixabay. (2015). Crown Golden Yellow. Repéré 26 février 2020, à <https://pixabay.com/vectors/crown-golden-yellow-emperor-576226/>

Réno-Dépôt. (s.d.). HUSQVARNA Tondeuse à essence, 21", 150 cc, orange 961480061. Repéré 2 mars 2020, à <https://www.renodepot.com/fr/husqvarna-tondeuse-a-essence-21-150-cc-orange-961480061-82305318>

Safety-klee. (s.d.). Parts Washer Solvent | Parts Cleaner Solvent Equipment & Services. Repéré 18 février 2020, à <https://www.safety-kleen.com/services/parts-washers/solvent-parts-washers>

Searspartsdirect.com. (s.d.-a). Looking for KitchenAid model KCM200OB0 coffee maker repair & replacement parts? Repéré 28 février 2020, à <https://www.searspartsdirect.com/model/605hjjghsu-000593/kitchenaid-kcm200ob0-coffee-maker-parts>

Searspartsdirect.com. (s.d.-b). Looking for Panasonic model MC-2730 canister vacuum repair & replacement parts? Repéré 28 février 2020, à <https://www.searspartsdirect.com/model/klychwp4ng-000789/panasonic-mc-2730-canister-vacuum-parts>

vectorstock. (s.d.). Turbines icons set airplane engine silhouettes Vector Image. Repéré 4 février 2020, à <https://www.vectorstock.com/royalty-free-vector/turbines-icons-set-airplane-engine-silhouettes-vector-6124554>

Walmart.ca. (s.d.). Cafetière à interrupteur Sunbeam de 12 tasses en noir. Repéré 2 mars 2020, à <https://www.walmart.ca/fr/ip/sunbeam-12-cup-black-switch-coffee-maker/6000196184894>

## ANNEXE A - LISTE DE CERTAINS MATÉRIAUX DE GRANDE VALEUR

Tableau A.1 Liste des métaux précieux et symboles chimiques

Métal	Symbole chimique
Or	Au
Argent	Ag
Platine	Pt
Rhodium	Rh
Scandium	Sc
Palladium	Pd
Ruthénium	Ru
Osmium	Os
Iridium	Ir

(24-carats.fr, 2015)

Tableau A.2 Liste des matériaux semi-précieux et symboles chimiques

Métal	Symbole chimique
Titane	Ti
Cuivre	Cu
Nickel	Ni
Aluminium	Al

(24-carats.fr, 2015)

Tableau A.3 Valeur des métaux contenus dans un circuit électronique d'ordinateur portable

Table I  
Metal content and economic value of waste PC-boards (per ton)

Metals	Content (%)**	Metal Price (\$/kg)*	Potential Value (\$)	Value Ratio (%)
Cu	9.7	3.6	349.2	4.80
Al	5.8	1.7	98.6	1.35
Fe	9.2	0.4	36.8	0.51
Ni	0.69	10.5	72.5	0.99
Pb	2.24	1.2	27.0	0.37
Sn	2.15	13	279.5	3.84
Ag	0.06	315	189.0	2.60
Au	0.023	24434	5620.0	77.17
Pd	0.01	6100	610.0	8.38
Total	29.87	--	7282	--

\*: London Metal Exchange, November, 2008

\*\* : Y. Chris, et al. [33]

(Yu, Williams et Ju, 2009)

## ANNEXE B – CERTAINS MATÉRIAUX TOXIQUES DANS LES COMPOSANTS DE PRODUITS

Tableau B.1 Certains matériaux toxiques pour la santé humaine dans les composants électriques

<b>Matériaux</b>	<b>Composants/ éléments</b>
Arsenic	Circuits imprimés
Cadmium	Certains aciers Chromage Colorants et pigments
Plomb	Batteries Peinture
Mercure	Batteries Interrupteurs Tubes fluorescents
Biphényles polychlorés (BPC)	Peintures Condensateurs Transformateurs Isolateurs Moteurs
Chlorofluorocarbures (CFC)	Refroidissant

(Crowe et al., 2003; Nations. et Affairs., 2011)

## ANNEXE C - CRITÈRES D'ÉVALUATION DES SCÉNARIOS DE FIN DE VIE

### VIE

Tableau C.1 Critères d'évaluation des scénarios de fin de vie (1/2)

		Conception pour la réutilisation (RE)			Conception pour la refabrication (RF)				
<b>A</b>	Fréquence de changements de conception du produit	20 ans		<b>5</b>	<b>A</b>	Quantité de produits similaires	Un par personne		<b>5</b>
		10 ans		<b>4</b>			Un par famille		<b>4</b>
		5 ans		<b>3</b>			Moins qu'un par famille		<b>3</b>
		2 ans		<b>2</b>			Produit pour usage collectif		<b>2</b>
		1 an		<b>1</b>			Produit très rare, spécialisé		<b>1</b>
		Téléphone cellulaire				Tracteur			
<b>B</b>	Nature du nettoyage nécessaire	Aucun nettoyage		<b>5</b>	<b>B</b>	Proportion de pièces standard dans le module	100% des pièces		<b>5</b>
		Nettoyage à sec		<b>4</b>			>50% des pièces		<b>4</b>
		Nettoyage à base d'eau		<b>3</b>			<50% des pièces		<b>3</b>
		Nettoyage spécialisé - avec solvant et dégraissant		<b>2</b>			<25% des pièces		<b>2</b>
		Nettoyage nécessitant des équipements spécialisés		<b>1</b>			Aucune pièce standard		<b>1</b>
<b>C</b>	État prédit du module en FDV	Aucun dommage des pièces		<b>5</b>	<b>C</b>	Fréquence de remplacement du module	> que 2x la durée de vie du produit		<b>5</b>
		Pièces usées		<b>4</b>			2x la durée de vie du produit		<b>4</b>
		1-2 pièces brisées		<b>3</b>			Égale à la durée de vie du produit		<b>3</b>
		Plusieurs pièces brisées remplaçables		<b>2</b>			Changement pour prolonger la durée de vie du produit		<b>2</b>
		Plusieurs pièces brisées non remplaçables		<b>1</b>			Changement très fréquent		<b>1</b>

Tableau C.2 Critères d'évaluation des scénarios de fin de vie (2/2)

		Conception pour le recyclage avec désassemblage (RD)			Conception pour le recyclage sans désassemblage (RS)				
A	Quantité de matériaux de grande valeur	100% du module de grande valeur		5	A	Facilité de tri des matériaux sans désassemblage	Moins que 2 matériaux facilement triables		5
		Deux matériaux ou plus en quantité suffisante		4			Moins que 5 matériaux facilement triables		4
		Au moins 1 matériau en quantité suffisante		3			Moins que 5 matériaux difficilement triables		3
		1 matériau en petite quantité		2			Plus que 10 matériaux différents facilement triables		2
		Aucun matériau de grande valeur		1			Plus que 10 matériaux différents difficilement triables		1
B	Quantité de pièces dans le module (excluant les attaches)	1 pièce		5	B	Proportion de matériaux toxiques utilisés dans le module	100% du module		5
		3 ou moins		4			>50% en volume		4
		10 ou moins		3			<50% en volume		3
		15 ou moins		2			<25% en volume		2
		plus de 15		1			Aucun		1
C	Quantité d'outils nécessaires pour le désassemblage du module	Aucun		5	C	Facilité de l'élimination du revêtement sur les pièces	Aucun revêtement		5
		1 outil standard		4			Très facilement décapable		4
		2 outils standards ou plus		3			Facilement décapable		3
		1 outil spécialisé		2			Difficilement décapable		2
		2 outils spécialisés ou plus		1			Intégré au matériau		1

## ANNEXE D - SÉPARATION DES PRODUITS ÉTUDIÉS EN MODULES

Tableau D.1 Séparation des produits étudiés en modules (1/2)

	Supporter les composants	Protéger	Commander le système	Interagir avec l'utilisateur et communiquer	Acquérir l'information
	quoi support	quoi / de quoi moyen	quoi grâce à	qui/quoi moyen	éléments captés moyen
<b>Imprimante</b>	Les pièces/composantes	Composantes / extérieur	Système entier	Utilisateur / produit	Niveau de papier + bourrage
	Chassis	Coque extérieure	Circuits imprimés	Boutons + lumières + programme informatique	Capteurs
<b>Cafetière</b>	Les pièces/composantes	Composantes / extérieur		Utilisateur / produit	
	Chassis	Coque extérieure		Boutons + lumières	
<b>Presse agrumes automatisé</b>	Les pièces/composantes	Composantes / extérieur			
	Chassis	Coque extérieure			
<b>Tondeuse à essence</b>	Les pièces/composantes	Composantes / extérieur		Utilisateur / produit	
	Chassis	Coque extérieure		Boutons + lumières	
<b>Aspirateur</b>	Les pièces/composantes	Composantes / extérieur	Système entier	Utilisateur / produit	
	Chassis	Coque extérieure	Circuits imprimés	Boutons + lumières	
<b>Aspirateur automatisé</b>	Les pièces/composantes	Composantes / extérieur	Système entier	Utilisateur / produit	Objets extérieurs, état du réservoir,
	Chassis	Coque extérieure	Circuits imprimés	Boutons + lumières + application	Capteurs
<b>Lecteur CD portable</b>	Les pièces/composantes	Composantes / extérieur	Système de lecture et transformation du signal	Utilisateur / produit	Présence de CD
	Chassis	Coque extérieure	Circuits imprimés	Boutons + lumières + écran	Capteurs
<b>Voiture téléguidée</b>	Les pièces/composantes	Composantes / extérieur	Système entier	Utilisateur / produit	
	Chassis	Carrosserie	Circuits imprimés	Boutons + lumières + Télécommande	
<b>Bicyclette électrique</b>	Les pièces/composantes		Système entier	Utilisateur / produit	Vitesse du vélo et tours de la roue
	Chassis		Circuits imprimés	Boutons + lumières	Capteurs
<b>Télévision LCD</b>	Les pièces/composantes	Composantes / extérieur	Système entier	Utilisateur / produit	
	Chassis	Coque extérieure	Circuits imprimés	Boutons + lumières + écran	

Cases en vert : éléments semblables pour plusieurs produits

Tableau D.2 Séparation des produits étudiés en modules (2/2)

	Stocker la matière	Échanger de la matière avec le milieu extérieur	Convertir et entraîner	Stocker l'énergie et la convertir + alimenter le système
	matière contenant	matière moyen	quoi moyen	type moyen
<b>Imprimante</b>	Papier + encre	Encre + papier	Dispositif d'impression	Electricité
	Bac à papier, sortie papier et cartouche d'encre	Dispositif d'impression	Moteur+ mécanisme d'entraînement	Cable d'alimentation électrique + protection
<b>Cafetière</b>	Café moulu + eau		Pompe	Electricité
	Réservoirs		Eau	Cable d'alimentation électrique + protection
<b>Presse agrumes automatisé</b>	Pulpe	Agrumes	Presse agrumes	Electricité
	Grillage du presse agrume	Mécanisme d'extraction du jus	Moteur+ mécanisme d'entraînement	Cable d'alimentation électrique + protection
<b>Tondeuse à essence</b>	Gazon coupé +essence + huile	Gazon	Lames de coupe	Essence
	Sac à gazon + réservoirs	Lames de coupe	Moteur+ mécanisme d'entraînement	Réservoir et tuyaux d'alimentation
<b>Aspirateur</b>	Poussière	Poussière	Système d'aspiration	Electricité
	Sac d'aspirateur	Système d'aspiration	Moteur + mécanisme d'entraînement	Cable d'alimentation électrique + protection
<b>Aspirateur automatisé</b>	Poussière	Poussière	Système d'aspiration	Électricité
	Réservoir plastique	Système d'aspiration	Moteur + mécanisme d'entraînement	Batterie + protection
<b>Lecteur CD portatif</b>	CD	Informations sur le CD	Mécanisme de rotation du CD et tête de lecture	Électricité
	Porte CD	Mécanisme de lecture (laser)	Moteur+ mécanisme d'entraînement en rotation	Batterie + protection
<b>Voiture téléguidée</b>			Roues	Électricité
			Moteur+ mécanisme d'entraînement	Batterie + protection
<b>Bicyclette électrique</b>			Mécanisme de rotation du CD et tête de lecture	Électricité
			Moteur+ mécanisme d'entraînement en rotation	Batterie + protection
<b>Télévision LCD</b>				Électricité
				Cable d'alimentation électrique + protection

## ANNEXE E - DESCRIPTION DES PRODUITS ÉTUDIÉS

### Imprimante laser

Produit étudié :

Imprimante laser DELL 1100.

Changement de conception : 10 ans.

Source d'énergie :

Électrique - cordon d'alimentation.

Milieu d'utilisation :

Utilisation intérieure.

Interface utilisateur sur le produit :

Boutons et lumières.

Matériaux principaux :

Thermodurcissable et châssis en métal.



Figure E.1 Imprimante

(Mpsprinters.com, s.d.)

### Exemple de vue éclatée (comme aide visuelle)

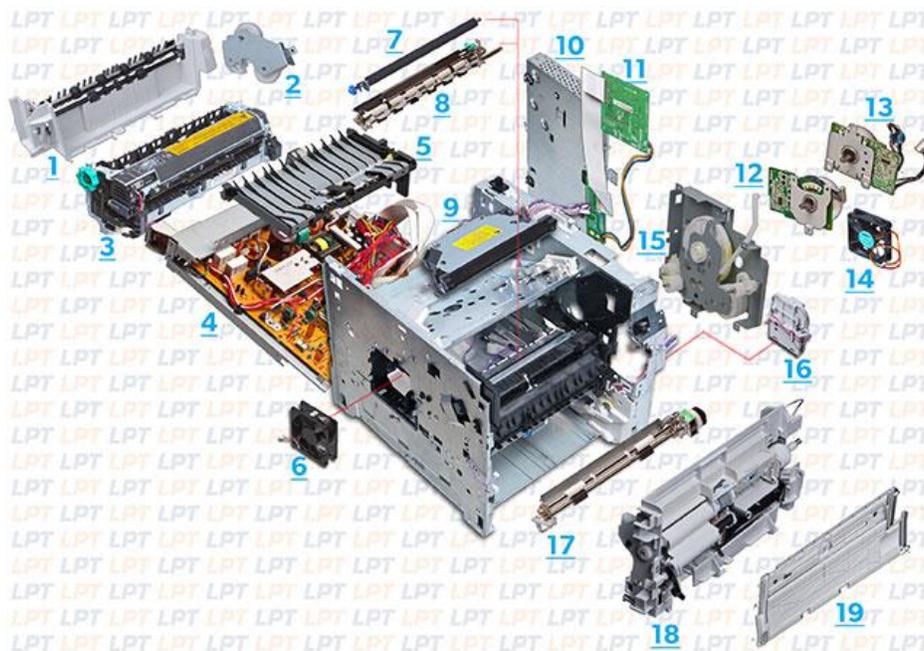


Figure E.2 Imprimante vue éclatée (Lbrty.com, s.d.)

## Cafetière

### Produit étudié :

Sunbeam 12 Cup Black Switch Coffee Maker.

Changement de conception : 5 ans.

### Source d'énergie :

Électrique - cordon d'alimentation.

### Milieu d'utilisation :

Utilisation intérieure

### Interface utilisateur sur le produit :

Boutons et lumières.

### Matériaux principaux :

Plastique et châssis en métal.



Figure E.3 Cafetière (Walmart.ca, s.d.)

## Exemple de vue éclatée (comme aide visuelle)

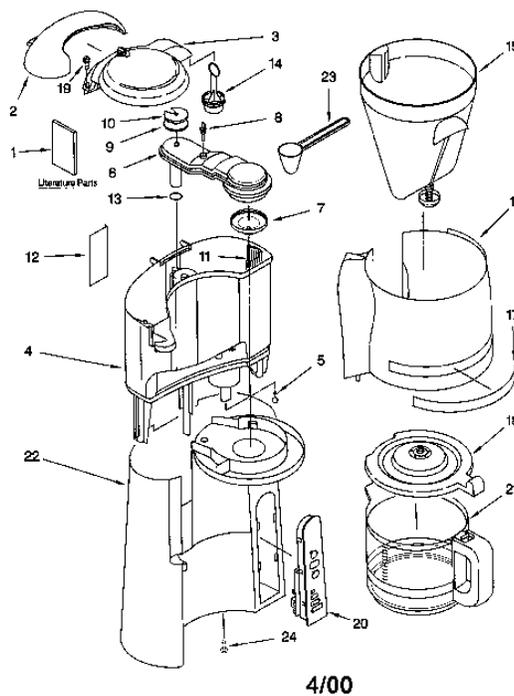


Figure E.4 Cafetière vue éclatée (Searspartsdirect.com, s.d.-a)

## Presse-agrumes automatisé

### Produit étudié :

Aicok Presse-agrumes électrique.

Changement de conception : 10 ans.

### Source d'énergie :

Électrique - cordon d'alimentation.

### Milieu d'utilisation :

Utilisation intérieure.

### Interface utilisateur sur le produit :

Aucun.

### Matériaux principaux :

Acier et plastique.



Figure E.5 Presse agrumes automatisé  
(Amazon.fr, s.d.)

## Exemple de vue éclatée (comme aide visuelle)

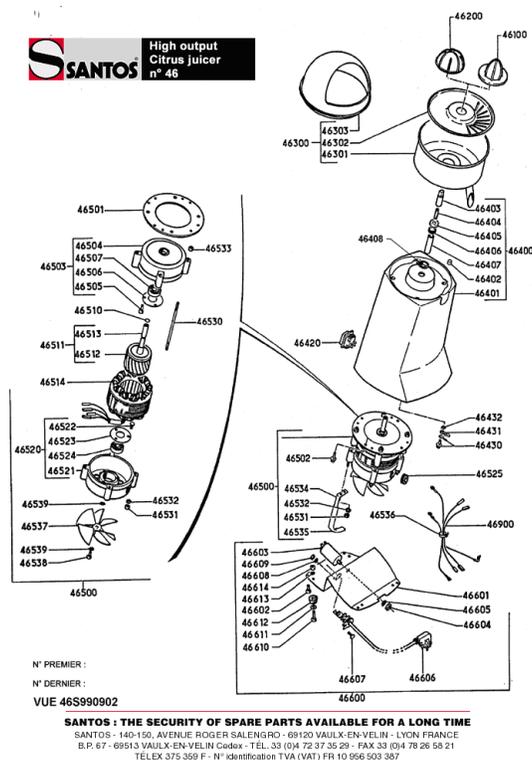


Figure E.6 Presse agrumes automatisé vue éclatée (Nesridiscount.com, s.d.)

## Tondeuse à essence

Produit étudié : Tondeuse à essence, 21",  
150 cc, Husqvarna.

Changement de conception : 20 ans.

Source d'énergie :

Essence – Moteur à essence.

Milieu d'utilisation :

Utilisation extérieure.

Interface utilisateur sur le produit :

Boutons.

Matériaux principaux :

Métal, plastique et toile.



Figure E.7 Tondeuse à essence

(Réno-Dépôt, s.d.)

## Exemple de vue éclatée (comme aide visuelle)

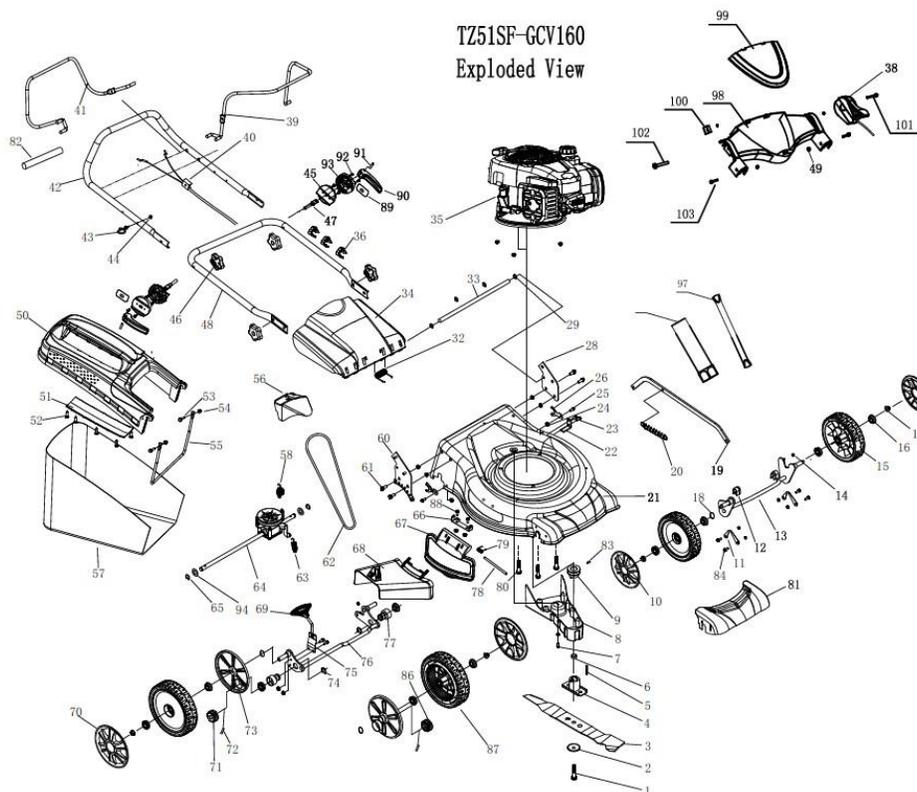


Figure E.8 Tondeuse à essence vue éclatée (Gardif, s.d.)

## Aspirateur standard

Produit étudié : Aspirateur Miele model compact c1.

Changement de conception : 10 ans.

Source d'énergie :

Électrique - cordon d'alimentation.

Milieu d'utilisation :

Utilisation intérieure.

Interface utilisateur sur le produit :

Boutons.

Matériaux principaux :

Plastique (ABS) et châssis en métal.

Exemple de vue éclatée (comme aide visuelle)



Figure E.9 Aspirateur standard

(LaBaie, s.d.)

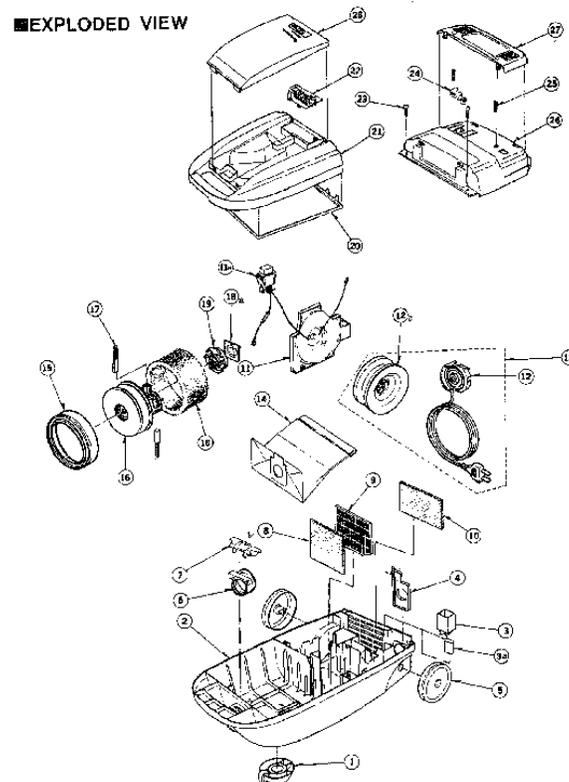


Figure E.10 Aspirateur standard vue éclatée (Searspartsdirect.com, s.d.)

## Aspirateur automatisé

Produit étudié : Aspirateur robot connecté Wi-Fi Roomba i7 d'iRobot.

Changement de conception : 1 an.

Source d'énergie :

Électrique – batterie rechargeable (nickel cadmium).

Milieu d'utilisation :

Utilisation intérieure.

Interface utilisateur sur le produit :

Boutons et lumières.

Matériaux principaux :

ABS et châssis en métal.

Exemple de vue éclatée (comme aide visuelle)



Figure E.11 Aspirateur automatisé  
(BestBuy.ca, s.d.)

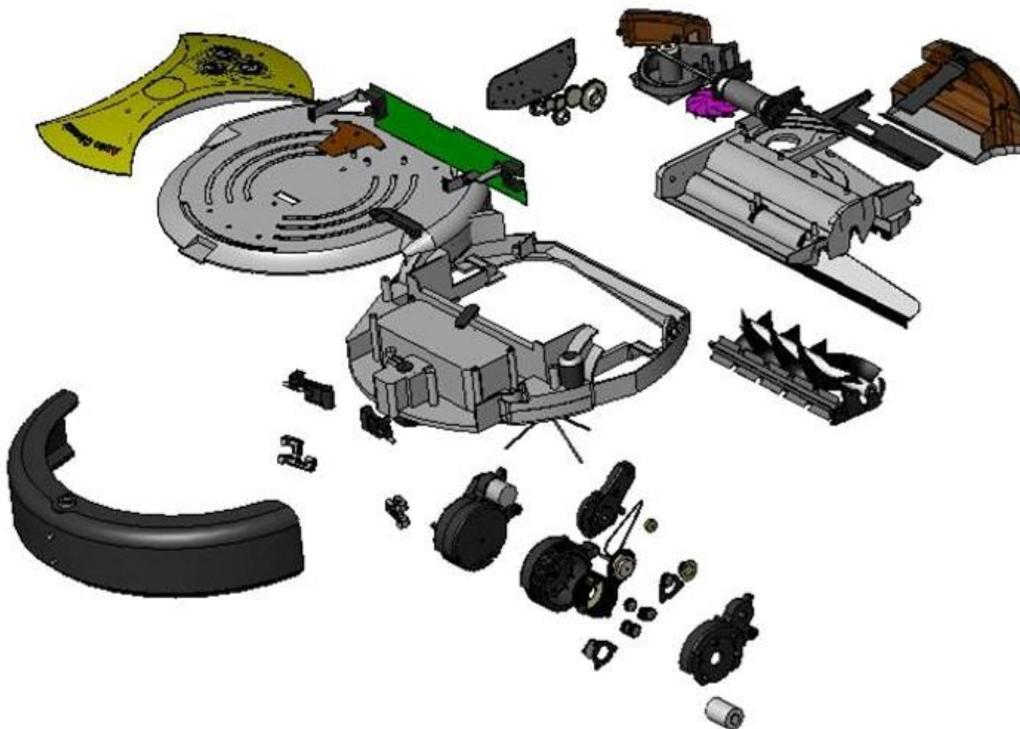


Figure E.12 Aspirateur automatisé vue éclatée (Eesi.e-monsite.com, s.d.)

## Lecteur CD portatif

Produit étudié : Lecteur CD portable  
Sony DEJ611 - Argent.

Changement de conception : 2 ans.

Source d'énergie :

Électrique – 2 Piles alcalines AA.

Milieu d'utilisation :

Utilisation intérieure et extérieure.

Interface utilisateur sur le produit :

Boutons, lumières et écran.

Matériaux principaux :

Polycarbonate (PC) et châssis en métal.



Figure E.13 Lecteur CD portatif  
(Amazon.com, s.d.)

## Vue éclatée

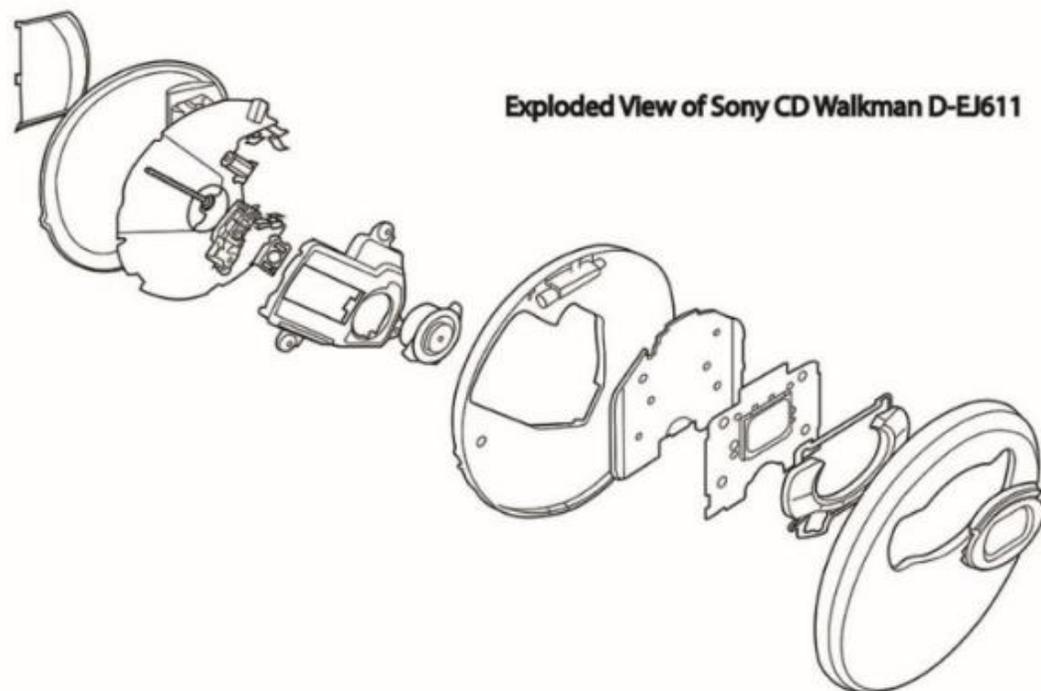


Figure E.14 Lecteur CD portatif vue éclatée (Esthergkim.com, s.d.)

## Voiture téléguidée

Produit étudié : Turbo King - Voiture téléguidée.

Changement de conception : 2 ans.

Source d'énergie :

Électrique – 3 Piles alcalines AA.

Milieu d'utilisation :

Utilisation extérieure.

Interface utilisateur sur le produit :

Boutons et lumières.

Matériaux principaux :

Plastique et châssis en métal.



Figure E.15 Voiture téléguidée  
(Boutique Courageux, 2020)

## Exemple de vue éclatée (comme aide visuelle)

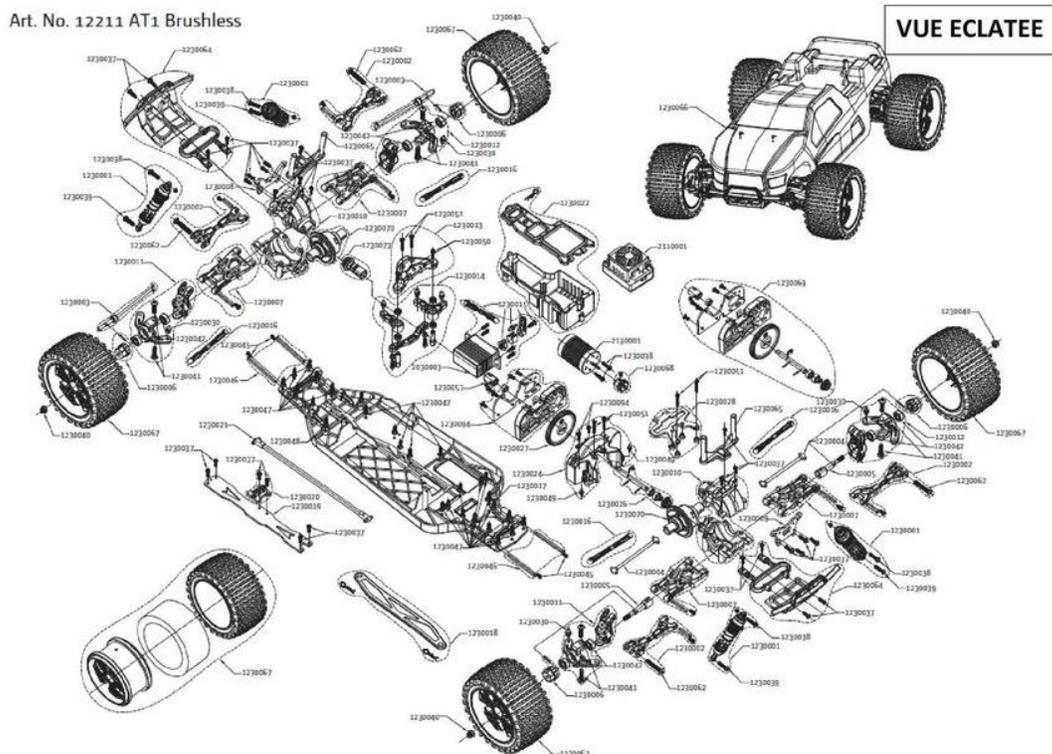


Figure E.16 Voiture téléguidée vue éclatée (Docplayer.fr, s.d.)

## **Bicyclette électrique**

Produit étudié : QiCYCLE EF1 Smart Electric Bike from Xiaomi.

Changement de conception : 5 ans.

Source d'énergie :

Électrique – Batterie rechargeable (Lithium ion)

Milieu d'utilisation :

Utilisation extérieure.

Interface utilisateur sur le produit :

Boutons, lumières et écran.

Matériaux principaux :

Aluminium et alliages d'aluminium et caoutchouc.

**Vue éclatée**



Figure E.17 Bicyclette électrique (Gearbest.com, 2018)



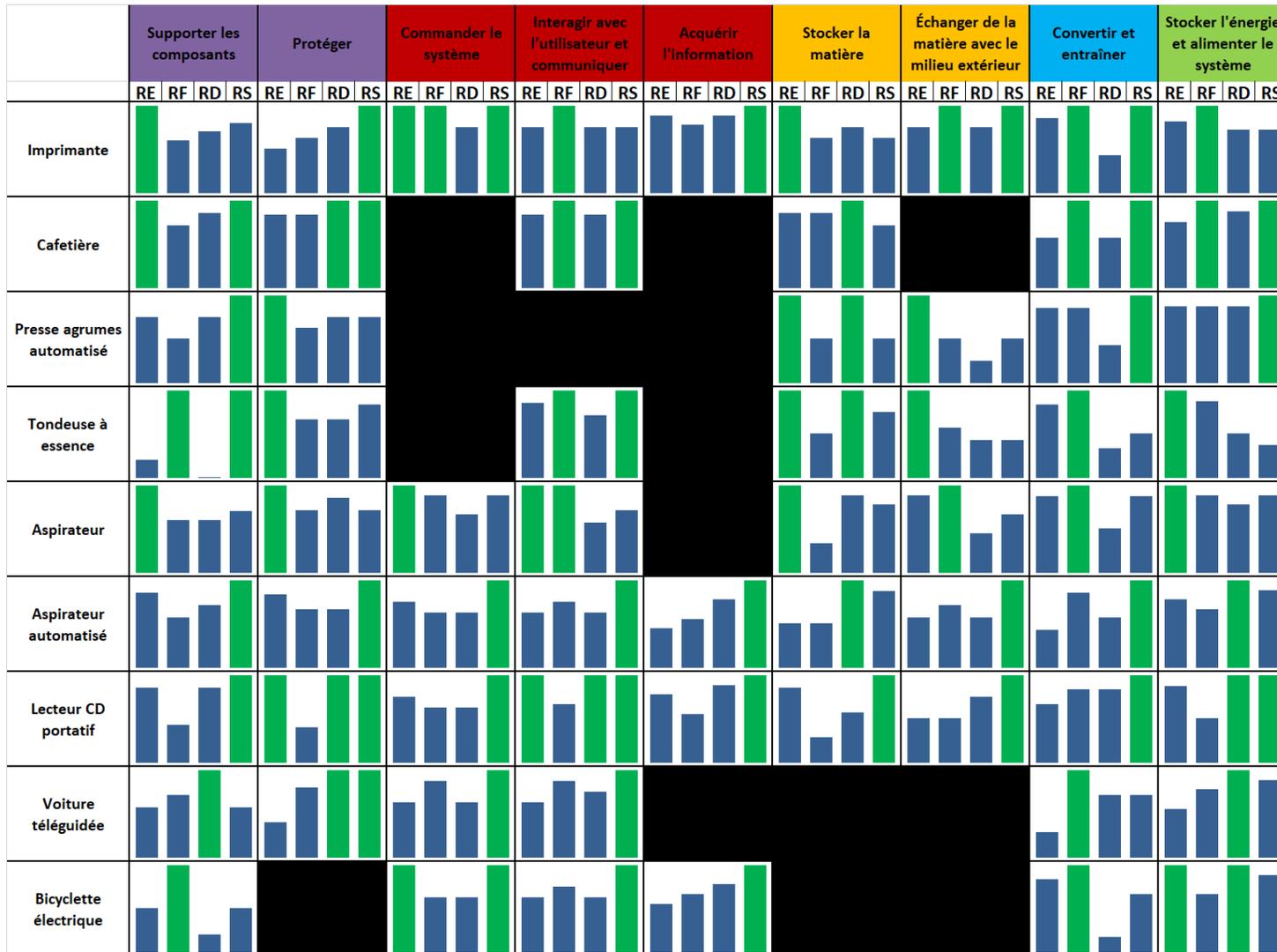
Figure E.18 Bicyclette électrique vue éclatée (iFixit, 2017)

## ANNEXE F – RÉSULTATS DE L’OCMFDV POUR 9 PRODUITS

Tableau F.1 Résultats de l’OCMFDV pour 9 produits

		Supporter les composants				Protéger				Commander le système				Interagir avec l'utilisateur et communiquer				Acquérir l'information				Stocker la matière				Échanger de la matière avec le milieu extérieur				Convertir et entraîner				Stocker l'énergie et alimenter le système							
		RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS				
Imprimante	A	4	4	1	5	4	4	1	5	4	4	5	2	4	4	4	2	4	4	4	3	4	4	1	4	4	4	3	2	4	4	1	4	4	4	2	4	4	4	2	4
	B	4	1	4	1	2	1	4	1	4	4	2	4	2	4	2	4	4	3	3	4	4	1	3	1	2	4	2	4	2	4	1	1	4	5	4	2				
	C	5	4	5	5	1	3	4	5	3	3	2	5	3	3	3	3	3	3	4	5	3	3	5	3	3	3	4	5	3	2	4	5	4	5	5	5				
		13	9	10	11	7	8	9	11	11	11	9	11	9	11	9	9	11	10	11	12	11	8	9	8	9	11	9	11	9	10	6	10	12	14	11	11				
Cafetière	A	3	4	1	4	3	4	1	5					3	4	2	4					3	4	1	4					3	4	1	4	3	4	2	4				
	B	3	1	4	1	2	1	4	1					2	3	3	2					2	3	4	1					2	3	2	1	3	4	4	2				
	C	4	3	4	5	3	3	4	3					3	2	3	3					3	2	5	3					2	3	4	5	3	3	4	5				
		10	8	9	10	8	8	9	9					8	9	8	9					9	9	10	8					7	10	7	10	9	11	10	11				
Presse agrumes automatisé	A	4	3	1	5	4	3	1	5									4	3	1	4	4	3	1	4	4	3	1	4	4	3	2	4								
	B	3	1	4	1	3	2	4	1									3	1	5	1	3	1	1	1	2	3	1	1	3	4	4	2								
	C	2	3	4	5	4	3	4	3									4	3	5	2	4	3	3	2	3	3	4	5	3	3	4	5								
		9	7	9	11	11	8	9	9									11	7	11	7	11	7	5	7	9	9	6	10	10	10	10	11								
Tondeuse à essence	A	5	3	1	4	5	3	1	5					5	3	1	4					5	3	1	3	5	3	1	4	5	3	1	3	5	3	1	4				
	B	2	1	3	1	2	2	3	1					2	5	4	1					3	2	5	1	2	2	2	1	1	4	1	1	2	4	3	1				
	C	4	4	3	3	2	2	3	2					2	2	3	5					3	2	5	5	3	2	3	1	2	2	3	2	4	3	3	1				
		4	8	3	8	9	7	7	8					9	10	8	10					11	7	11	9	10	7	6	6	8	9	5	6	11	10	7	6				
Aspirateur	A	4	4	1	4	4	4	1	5	4	4	5	2	4	4	1	4					4	4	1	4	4	4	1	3	4	4	1	4	4	4	2	4				
	B	5	1	4	1	3	2	4	1	4	4	2	4	3	3	3	1					4	1	5	1	3	4	2	1	3	4	2	1	4	4	4	2				
	C	4	4	4	5	3	2	4	2	4	3	2	5	3	3	3	3					4	1	5	5	4	4	4	5	3	3	4	5	4	3	4	5				
		13	9	9	10	10	8	9	8	12	11	9	11	10	10	7	8					12	6	11	10	11	12	7	9	10	11	7	10	12	11	10	11				
Aspirateur automatisé	A	1	3	1	4	1	3	1	5	1	3	5	2	1	3	2	4	1	3	4	3	1	3	1	4	1	3	1	3	1	3	1	4	1	3	4	2				
	B	3	1	4	1	3	1	3	1	4	3	1	4	4	4	3	4	3	3	2	4	3	1	5	1	3	2	2	2	2	3	3	1	5	4	5	4				
	C	5	3	3	5	4	3	3	3	4	2	2	5	3	2	3	3	3	2	4	5	3	3	5	5	3	3	4	5	3	3	3	5	4	2	3	5				
		9	7	8	10	8	7	7	9	9	8	8	11	8	9	8	11	7	8	10	12	7	7	11	10	7	8	7	10	6	9	7	10	10	9	12	11				
Lecteur CD portatif	A	2	1	1	4	2	1	1	4	2	1	5	2	2	1	4	2	2	1	4	3	2	1	1	4	2	1	3	2	2	1	1	3	2	1	4	2				
	B	2	1	4	1	3	1	3	1	4	4	1	4	4	3	2	4	4	4	3	4	3	1	3	1	2	3	3	4	2	4	4	1	5	4	4	4				
	C	5	4	4	5	3	3	4	3	3	3	2	5	3	3	3	3	4	3	4	5	4	3	3	5	3	3	3	5	3	3	3	5	3	2	3	5				
		9	6	9	10	8	5	8	8	9	8	8	11	9	7	9	9	10	8	11	12	9	5	7	10	7	7	9	11	7	8	8	9	10	7	11	11				
Voiture téléguidée	A	1	3	1	4	1	3	1	5	1	3	5	2	1	3	2	4													1	3	1	4	1	3	4	2				
	B	3	1	5	1	2	1	3	1	4	3	1	4	4	5	4	2													2	4	3	1	4	4	4	4				
	C	3	4	4	2	2	3	4	2	3	4	2	5	3	2	3	5													2	3	4	3	3	3	4	5				
		7	8	10	7	5	7	8	8	8	10	8	11	8	10	9	11													5	10	8	8	8	10	12	11				
Bicyclette électrique	A	3	3	1	4					3	3	5	2	3	3	2	4	3	3	4	3									3	3	1	4	3	3	4	2				
	B	1	5	3	1					4	3	1	4	2	4	3	2	2	4	3	4									1	4	2	1	5	4	5	4				
	C	4	5	1	3					4	2	2	5	3	2	3	5	3	2	3	5									4	2	1	2	4	2	3	5				
		8	13	5	8					11	8	8	11	8	9	8	11	8	9	10	12									8	9	4	7	12	9	12	11				

Tableau F.2 Résultats graphiques des résultats de l'OCMFDV pour 9 produits



## ANNEXE G – RÉSULTATS DE L’OCMFDV SELON LA DÉCOMPOSITION EN SYSTÈMES

Tableau G.1 Résultats de l’OCMFDV selon la décomposition en systèmes

		Système d'armature				Système de contrôle				Système principal				Système de distribution et transmission d'énergie				Système de force motrice principale			
		RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS
Imprimante	A	4	4	1	5	4	4	4	2	4	4	3	2	4	4	1	4	4	4	2	4
	B	2	1	3	1	2	4	2	4	2	3	2	3	2	4	1	1	4	5	4	2
	C	3	3	4	5	3	3	2	3	3	3	4	3	3	2	4	5	4	5	5	5
		9	8	8	11	9	11	8	9	9	10	9	8	9	10	6	10	12	14	11	11
Cafetière	A	3	4	1	4	3	4	2	4	3	4	1	4	3	4	1	4	3	4	2	4
	B	2	1	4	1	2	4	2	4	2	3	4	1	2	3	2	1	3	4	4	2
	C	3	3	4	5	3	3	2	3	3	2	5	3	2	3	4	5	3	3	4	5
		8	8	9	10	8	11	6	11	8	9	10	8	7	10	7	10	9	11	10	11
Presse agrumes automatisé	A	4	3	1	5					4	3	1	4	4	3	1	4	4	3	2	4
	B	3	2	3	1					3	1	1	1	2	3	1	1	3	4	4	2
	C	5	3	4	3					4	3	3	2	3	3	4	5	3	3	4	5
		12	8	8	9					11	7	5	7	9	9	6	10	10	10	10	11
Tondeuse à essence	A	5	3	1	4	5	3	1	4	5	3	1	3	5	3	1	3	5	3	1	4
	B	2	2	3	1	2	5	4	1	2	2	2	1	1	4	1	1	2	4	3	1
	C	2	2	3	2	2	2	3	5	3	2	3	1	2	2	3	2	4	3	3	1
		9	7	7	7	9	10	8	10	10	7	6	5	8	9	5	6	11	10	7	6
Aspirateur	A	4	4	1	4	4	4	4	2	4	4	1	3	4	4	1	4	4	4	2	4
	B	3	2	3	1	3	3	1	4	3	2	2	1	3	4	2	1	4	4	4	2
	C	3	2	4	2	3	3	2	3	4	1	4	5	3	3	4	5	4	3	4	5
		10	3	8	7	10	10	7	9	11	7	7	9	10	11	7	10	12	11	10	11
Aspirateur automatisé	A	1	3	1	4	1	3	4	2	1	3	1	3	1	3	1	4	1	3	4	2
	B	3	1	3	1	3	4	1	4	3	2	2	2	2	3	3	1	5	4	5	4
	C	4	3	3	3	2	2	2	3	3	3	4	5	3	3	3	5	4	2	3	5
		8	7	7	8	6	9	7	9	7	8	7	10	6	9	7	10	10	9	12	11
Lecteur CD portable	A	2	1	1	4	2	1	4	1	2	1	3	2	2	1	1	3	2	1	4	2
	B	2	1	3	1	4	3	1	4	2	2	3	3	2	4	4	1	5	4	4	4
	C	3	3	4	3	3	3	2	3	3	3	3	5	3	3	3	5	3	2	3	5
		7	5	8	8	9	7	7	8	7	6	9	10	7	8	8	9	10	7	11	11
Voiture téléguidée	A	1	3	1	4	1	3	4	2					1	3	1	4	1	3	4	2
	B	2	1	3	1	4	4	1	3					2	4	3	1	4	4	4	4
	C	2	3	4	2	3	2	2	5					2	3	4	3	3	3	4	5
		5	7	8	7	8	9	7	10					5	10	8	8	8	10	12	11
Bicyclette électrique	A	3	3	1	4	3	3	4	1					3	3	1	4	3	3	4	2
	B	1	5	3	1	2	3	1	4					1	4	2	1	5	4	5	4
	C	4	5	1	3	3	2	2	5					4	2	1	2	4	2	3	5
		8	13	5	8	8	8	7	10					8	9	4	7	12	9	12	11

Tableau G.2 Résultats graphiques de l'OCMFDV selon la décomposition en systèmes

	Système d'armature				Système de contrôle				Système principal				Système de distribution et transmission d'énergie				Système de force motrice principale			
	RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS	RE	RF	RD	RS
Imprimante	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cafetière	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Presse agrumes automatisé	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Tondeuse à essence	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Aspirateur	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Aspirateur automatisé	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Lecteur CD portatif	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Voiture téléguidée	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bicyclette électrique	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

## ANNEXE H – DONNÉES DE L'ÉTUDE DE CAS



Figure H.1 Télévision

(Philips.co.in, s.d.)

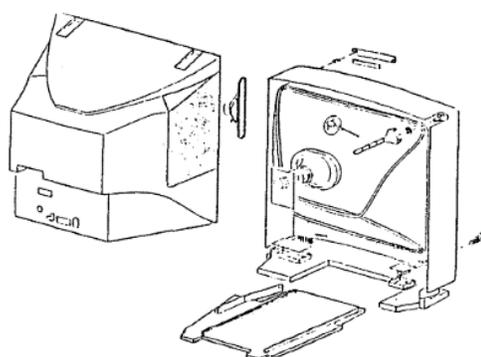


Figure H.2 Télévision vue éclatée

(Boks et al., 1996)

Tableau H.1 Caractéristiques de la télévision

<b>Marque</b>	Philips
<b>Nom du produit</b>	Télévision couleur 21"
<b>Caractéristiques</b>	Caractéristiques standard
<b>Durée de vie utile (années)</b>	10-25
<b>Cycle de conception (années)</b>	2-3
<b>Cycle technologique (années)</b>	6
<b>Complexité fonctionnelle</b>	Moyenne
<b>Objectif de la recherche</b>	Acceptabilité, résolution, consommation d'énergie
<b>Raison de la fin de vie</b>	Usé, dépassé
<b>Intérêt des compagnies pour l'écoconception</b>	Consommation d'énergie, réduction des substances ayant un impact sur l'environnement
<b>Nombre de matériaux</b>	15

<b>Matériaux recyclables</b>	Plastiques, verre, cuivre, métaux précieux
<b>Propreté du produit</b>	Moyenne
<b>Fin de vie des pièces actuellement (% de pièces)</b>	Réutilisation et refabrication : 0% Recyclage primaire : 44% Recyclage secondaire : 33% Mise en décharge : 22%
<b>Intérêt pour le désassemblage</b>	Tri des matériaux
<b>Nombre de pièces</b>	100
<b>Nombre de modules</b>	5
<b>Quantité d'attachelements</b>	50
<b>Temps de désassemblage actuel</b>	405 s
<b>Accessibilité des composants</b>	Moyenne
<b>Temps de désassemblage par fin de vie</b>	Réutilisation et refabrication : - Recyclage primaire : 310 s Recyclage secondaire : 445 s Mise en décharge : 355 s
<b>Responsabilité du recyclage</b>	Producteur
<b>Bénéficiaire du recyclage</b>	Philips

(Catherine M. Rose, Ishii et Masui, 1998; Catherine Michelle Rose, 2000; Van Beek, Erden et Tomiyama, 2010)

Tableau H.2 Association fonctions modules pour la télévision LCD

	Supporter les composants	Protéger	Commander le système	Interagir avec l'utilisateur et communiquer	Acquérir l'information	Stocker la matière	Échanger de la matière avec le milieu extérieur	Convertir et entraîner	Stocker l'énergie et alimenter le système
	quoi support	quoi / de quoi moyen	quoi grâce à	qui/quoi moyen	éléments captés moyen	matière contenant	matière moyen	quoi moyen	type moyen
Télévision LCD	Les pièces/ composants	Composantes / extérieur	Système entier	Utilisateur / produit					Électricité
	Chassis	Coque extérieure	Circuits imprimés	Boutons + lumières + écran					Cable d'alimentation électrique