

OPTIMISATION DES CHAÎNES
D'APPROVISIONNEMENT EN BOUCLE FERMÉE DANS
UN CONTEXTE D'ÉCONOMIE CIRCULAIRE À L'ÈRE
DE L'INDUSTRIE 4.0

par

Victor DELPLA

MÉMOIRE PAR ARTICLES PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE MÉCANIQUE
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 5 JANVIER 2021

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Victor Delpla, 2020



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Lucas A. Hof, directeur de mémoire
Département de Génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Jean-Pierre Kenné, codirecteur de mémoire
Département de Génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Christian Belleau, président du jury
Département de Génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Tasseda Boukherroub, membre du jury
Département de Génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 18 DÉCEMBRE 2020

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Le présent mémoire est l'aboutissement du travail de recherche effectué dans l'objectif de l'obtention de la maîtrise en génie mécanique de l'École de Technologie Supérieure de Montréal. J'ai eu la chance d'intégrer ce programme grâce au partenariat entre l'ÉTS de Montréal et les Arts et Métiers ParisTech, université dans laquelle je suivais le cursus d'obtention du diplôme d'ingénieur.

REMERCIEMENTS

Je remercie les professeurs Lucas Hof et Jean-Pierre Kenné pour m'avoir proposé ce sujet de maîtrise et pour la liberté, l'intégrité et la confiance qu'ils ont pu m'accorder durant ce mémoire, et pour m'avoir accompagné lors de chaque instant de mon travail de recherche. Je les remercie aussi pour leur soutien financier.

Je tiens également à remercier les différents établissements qui m'ont accueilli dans les meilleures conditions tout au long de mes études supérieures, le lycée Chaptal à Paris, les Arts et Métiers ParisTech et l'École de Technologie Supérieure de Montréal. Mes remerciements vont aussi aux professeurs qui ont su me transmettre leurs connaissances et aux membres du personnel pour leur travail quotidien.

Je remercie ensuite mon frère Alexandre, ainsi que son épouse Esther, qui sont pour moi des exemples à suivre pour s'épanouir dans sa vie professionnelle. Ils seront de merveilleux parents pour leur fils Léopold.

Je souhaite aussi remercier mes parents qui m'ont toujours soutenu dans mes études et dans chacune de mes étapes de la vie, en me donnant le goût du savoir et du travail.

Je n'oublie pas de remercier aussi Aubin, Rémi, Romain, Salomé et Thomas pour ces deux années passées à Montréal, pour avoir supporté ou non mon humour au quotidien, pour toutes ces soirées et pour avoir vécu ensemble les joies et les galères de la recherche.

Merci aussi à Charlotte, Pods, Papy, Sam, Clémence, Maxime H., Florian, Guillaume, Aubin G., Sixtine, Lauriane, Maxime B., Colombine et tant d'autres belles personnes rencontrées au Québec pour les moments passés à leur côté.

Optimisation des chaînes d'approvisionnement en boucle fermée avec l'internet des objets dans un contexte d'économie circulaire à l'ère de l'Industrie 4.0

Victor DELPLA

RÉSUMÉ

L'Économie Circulaire est une nouvelle conception de l'économie répondant au problème de l'appauvrissement des ressources naturelles. Pour rester compétitif économiquement et répondre aux nouvelles attentes écologiques des consommateurs, les chaînes d'approvisionnement en boucle fermée (closed-loop supply chains, CLSC) sont une solution concrète pour l'industrie manufacturière avec la réutilisation des produits en fin de vie (end-of-life, EOL) et le recyclage des matières premières.

Néanmoins, les CLSC sont difficiles à mettre en place à cause de la difficulté à récupérer de manière optimale les produits EOL étant donné les incertitudes qui existent sur leur condition après leur utilisation. Ces incertitudes complexifient la gestion des CLSC en empêchant de planifier efficacement les flux. Les technologies de l'Industrie 4.0 comme l'Internet des Objets (IoT) peuvent les réduire avec la collecte de données sur son état de dégradation tout au long du cycle de vie du produit. Le choix du traitement de récupération du produit et de ses composants en serait alors facilité et aucune étape d'inspection ne serait nécessaire. Les produits EOL récupérés pourraient aussi être sélectionnés de manière optimale.

Ce travail propose un modèle de CLSC qui optimise les flux pour maximiser le profit généré par la réutilisation des produits EOL d'une entreprise manufacturière en utilisant l'IoT. On utilisera un modèle en programmation linéaire sur LINGO considérant plusieurs produits modulaires pour étudier les retombées d'une telle CLSC. L'apport principal de ce mémoire est donc de montrer les potentiels gains de la mise en place d'une CLSC dont la récupération et le choix de traitements des produits EOL sont dirigés par l'IoT. Ainsi, dans le cas où les produits refabriqués représenteraient 40% de la demande totale, on peut atteindre une augmentation de près de 48% du profit grâce au modèle de CLSC présenté. Ce travail montre aussi la compatibilité entre les intérêts économiques et une consommation plus raisonnable des ressources naturelles, moins exploitées grâce à la récupération des produits EOL.

Mots-clés : Chaîne d'approvisionnement en boucle fermée, Internet des Objets, Économie Circulaire, Industrie 4.0

Closed-loop supply chain optimization with the Internet of Things in a context of circular economy in the era of Industry 4.0

Victor DELPLA

ABSTRACT

The Circular Economy is a new conception of the economy responding to the problem of the exhaustion of natural resources. To remain economically competitive and meet the new ecological expectations of consumers, closed-loop supply chains (CLSC) are a concrete solution for the manufacturing industry with the reuse of end-of-life products (EOL) and the recycling of raw materials.

However, CLSCs are difficult to implement because of the difficulty of optimally recovering EOL products given the uncertainties that exist about their condition after use. These uncertainties complicate the management of CLSCs by preventing effective flow planning. Industry 4.0 technologies such as the Internet of Things (IoT) can reduce them with the collection of data on its degradation condition throughout the product lifecycle. The choice of recovery treatment for the product and its components would then be facilitated and no inspection steps would be required. Recovered EOL products could also be optimally selected.

This work proposes a CLSC model that optimizes flows to maximize the profit generated by the reuse of EOL products from a manufacturing company using IoT. A linear programming model on LINGO considering several modular products will be used to study the impact of such a CLSC. The main contribution of this research is to show the potential benefits of setting up a CLSC whose recovery and choice of processing of EOL products are directed by the IoT. Thus, in the case where remanufactured products would represent 40% of the total demand, an increase in profit of nearly 48% can be achieved thanks to the CLSC model presented. This work also shows the compatibility between economic interests and a more responsible consumption of natural resources, less exploited due to the recovery of EOL products.

Keywords: Closed Loop Supply Chain, Internet of Things, Circular Economy, Industry 4.0

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.1.1 Approche linéaire du cycle de vie.....	3
1.1.2 Conséquence de l'approche linéaire du cycle de vie des produits.....	4
1.1.3 La fin de vie des produits.....	5
1.1.3.1 La production des déchets.....	5
1.1.3.2 La collecte des produits EOL.....	9
1.1.3.3 Les insuffisances du recyclage.....	10
1.2 L'Économie Circulaire.....	11
1.2.1 Le développement durable.....	11
1.2.2 Définition du concept d'Économie Circulaire	13
1.2.3 Les bénéfices de l'Économie Circulaire	16
1.2.4 Transition vers l'Économie Circulaire.....	18
1.3 L'Industrie 4.0.....	19
1.3.1 De nouveaux enjeux industriels	20
1.3.2 Les outils de l'Industrie 4.0	22
1.3.3 L'Industrie 4.0 au service de l'Économie Circulaire	25
1.4 Un problème de logistique inverse	26
1.4.1 Les différents types de logistiques inverses.....	27
1.4.1.1 La logistique inverse en boucle ouverte.....	27
1.4.1.2 La logistique inverse en boucle fermée	28
1.4.2 Une nouvelle conception de la logistique inverse.....	29
1.4.3 Impact de l'Industrie 4.0 sur les CLSC.....	30
1.4.4 Techniques de modélisation et de résolution des problèmes de réseaux manufacturiers.....	32
1.5 Conclusion	34
1.5.1 Résumé de l'analyse critique de la littérature	34
1.5.2 Problématiques et objectifs de recherche.....	34
1.5.3 Méthodologie	36
CHAPITRE 2 CIRCULAR MANUFACTURING 4.0: TOWARDS INTERNET OF THINGS EMBEDDED CLOSED-LOOP SUPPLY CHAINS IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0.....	37
2.1 Abstract.....	37
2.2 Introduction.....	38
2.3 Literature review	40
2.3.1 Recovery processsing.....	41
2.3.2 IoT and embedded sensors.....	42
2.3.3 Existing CLSCs models	43

2.1	Problem statement.....	45
2.4.1	Objectives	47
2.4.2	Assumptions.....	47
2.4.3	Nomenclature	48
2.4.4	Device of Internet of Thing (DIOT)	51
2.5	Mathematical model.....	56
2.5.1	Variables and parameters.....	56
2.5.2	Objective function.....	58
2.5.2.1	Total revenue	59
2.5.2.2	Total cost.....	59
2.5.3	Circular Economy Total Profit.....	60
2.5.4	Constraints	61
2.5.4.1	Sales and Collection center demand	61
2.5.4.2	Stock management	62
2.5.4.3	Manufacturing.....	62
2.5.4.4	Recycling	62
2.5.4.5	Remanufacturing.....	63
2.5.4.6	Products Assembly.....	63
2.5.4.7	Raw materials management	64
2.6	A case study: a numerical example.....	64
2.6.1	Fairphone: a modular smartphone	64
2.6.2	Model ajustement.....	66
2.6.3	Case Study Numerical Data	68
2.6.4	DIOT modeling.....	69
2.6.5	Studied variables.....	71
2.6.6	Parameter variation range	71
2.6.7	Reference case of the sensitivity analysis.....	74
2.6.8	Sensitivity analysis.....	77
2.6.9	Optimal EOL product selection	82
2.7	Conclusion	83
CHAPITRE 3	VERS LA PRÉVISION DE L'ÉTAT DE DÉGRADATION DES PRODUITS EN FIN DE VIE	85
3.1	Introduction.....	85
3.2	Le <i>dIoT</i> : reflet de l'utilisation des consommateurs	85
3.3	Le <i>dIoT</i> : reflet d'une réalité mécanique	87
3.4	Détecter les dégradations	89
3.5	Prédire les dégradations	92
3.6	Conclusion	93
CONCLUSION.....		95
RECOMMANDATIONS		97
ANNEXE I	PROGRAMME LINGO POUR L'ÉTUDE DE CAS.....	99

ANNEXE II	DONNÉES NUMÉRIQUES POUR L'ÉTUDE DE CAS (1)	121
ANNEXE III	DONNÉES NUMÉRIQUES POUR L'ÉTUDE DE CAS (2)	122
ANNEXE IV	DONNÉES NUMÉRIQUES POUR L'ÉTUDE DE CAS (2)	123
APPENDICE I	PREUVE DE SOUMISSION DE L'ARTICLE DE REVUE.....	124
APPENDICE II	ARTICLE DE CONFÉRENCE	125
BIBLIOGRAPHIE		139

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1	Composition des ordures ménagères collectées (ADEME, 2010).....	7
Tableau 1.2	Teneurs en minéraux de la mine urbaine (Grimaud, 2019)	9
Tableau 2.1	Problem parameters of the developed CLSC model.....	48
Tableau 2.2	Problem decision variables of the developed CLSC model.....	50
Tableau 2.3	Fairphone 2 components list	65
Tableau 2.4	Fairphone 2 parameters.....	68
Tableau 2.5	Fairphone 2 parameters.....	68
Tableau 2.6	Raw materials considered in the Fairphone 2	69
Tableau 2.7	Component diotn, i, j, t PROBvalues	70
Tableau 2.8	Parameter values for the reference case.....	72
Tableau 2.9	Parameters of the different smartphone models.....	73
Tableau 2.10	Product demands	73
Tableau 2.11	Component demands and importance component weights.....	74
Tableau 2.12	Profits in reference case	74
Tableau 2.13	Values of product-related decision variables for the reference case.....	75
Tableau 2.14	Values of component-related decision variables for the reference case	75
Tableau 2.15	Values of raw material-related decision variables for the reference case..	76

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Présentation du cycle de vie linéaire des produits (Recyc-Québec, 2019) .3
Figure 1.2	Évolution de la biocapacité du monde entre 1961 et 2018 (Global Footprint Network, 2018)5
Figure 1.3	Réacheminement et élimination des déchets solides, Canada, 2002 à 2016 (Environnement et Changement climatique Canada, 2018)7
Figure 1.4	Réacheminement des déchets solides selon le type de matières, Canada, 2002 à 2016 (Environnement et Changement climatique Canada, 2018) ...8
Figure 1.5	Les dimensions du développement durable13
Figure 1.6	Schéma de l'Économie Circulaire (Recyc-Québec, 2019)15
Figure 1.7	Chronologie des quatre révolutions industrielles (Hof, 2018).....20
Figure 1.8	Les outils de l'Industrie 4.0 (INSA Stasbourg, 2018)23
Figure 1.9	Exemple d'un réseau de logistique inverse en boucle ouverte (Gou, Liang, Huang, & Xu, 2008)28
Figure 1.10	Exemple du réseau d'une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée (Tonanont, Yimsiri, Jitpitaklert, & Rogers, 2008).....29
Figure 2.1	Circular Economy flows and processes39
Figure 2.2	CLSC model considering the remanufacturing and disposal of a single modular product and its components44
Figure 2.3	CLSC model developed in the study46
Figure 2.4	Device of the Internet of Things (DIOT)52
Figure 2.5	Principle of choice for component recovery processing according to its diotn, i, j, t and its assessment on the threshold values n_{j1} , n_{j2} and n_{j3}52
Figure 2.6	Remanufacturing cost f_n , i, j, t according to diotn, i, j, t53
Figure 2.7	Principle of choice of product recovery processing according to its diotn, i, t and its evaluation on the threshold values n_{i1} and n_{i2}54

Figure 2.8	Recovery rate for EOL products rn, i, t according to $diotn, i, t$55
Figure 2.9	Fairphone 2 disassembly components (Fairphone, 2015).....65
Figure 2.10	CLSC model adapted to the Fairphone case67
Figure 2.11	TPCE variation for different values of ra, rv and rf77
Figure 2.12	TPCE variation for different values of $diot1, i, j, tPROB$78
Figure 2.13	TPCE for different probability distributions of $diot1, i, 3, tPROB$79
Figure 2.14	TPCE/TPDirectLoop (%) for different quantity of EOL products recovered.....80
Figure 2.15	Total profit according to the number of products proposed81
Figure 2.16	TPCE/TPDirectLoop (%) with and without the possibility to select the returned products83
Figure 3.1	Dégâts typiques présents sur les écrans de smartphone (Schaub et al., 2014)86
Figure 3.2	Critère de Griffith pour une fissure de longueur $2a$ soumise à une contrainte uni axiale qui lui est perpendiculaire dans une plaque infinie ..88
Figure 3.3	Processus de détection des défauts d'une surface en verre (Ming et al., 2020)91
Figure 3.4	Conception d'un modèle prédictif de contrôle (Beal, Hill, Martin, & Hedengren, 2018).....92

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

EC	Économie Circulaire
CE	Circular Economy
EOL	End-of-Life
FDV	En fin de vie
CLSC	Closed-Loop Supply Chain
CM	Circular Manufacturing
IoT	Internet of Things
RFID	Radio Frequency Identification

INTRODUCTION

L'épuisement des ressources naturelles et la sensibilisation croissante des populations à une consommation plus responsable du point de vue écologique nous pousse à repenser notre manière de concevoir l'économie et la gestion du cycle de vie des produits.

Ces nouveaux défis influent de plus en plus sur la manière de penser les chaînes d'approvisionnement (Stahel, 2013). Les chaînes d'approvisionnement en boucle fermée, ou closed-loop supply chain en anglais (CLSC), sont une approche considérant les nouveaux enjeux environnementaux, sociétaux et économiques durant l'ensemble du cycle de vie des produits, de l'extraction des matières premières à la fin de vie du produit (Mtalaa & Aggoune, 2010; Soleimani & Govindan, 2014).

La mise en place d'une CLSC entraîne des problèmes de logistique inverse. En effet, le succès d'une CLSC au niveau économique et environnementale dépend de la capacité à récupérer de manière optimale les produits en fin de vie (FDV ou end-of-life, EOL) et à choisir le meilleur traitement de récupération. C'est assurément une des grandes difficultés de la logistique inverse car les produits FDV ont été soumis à un environnement durant leur utilisation entraînant de grandes incertitudes sur leurs conditions. Ces incertitudes sont l'un des problèmes principaux des CLSC car elles provoquent des difficultés pour planifier les flux de ces chaînes d'approvisionnement, notamment pour optimiser l'aspect économique (Temur & Bolat, 2012).

À l'ère de l'Industrie 4.0 et du numérique, l'Internet des Objets (Internet of Things, IoT) peut permettre de surmonter ces problèmes. En collectant des données sur les produits avec des capteurs puis en les transmettant au fabricant, ce dernier peut connaître l'état de dégradation de chacun des produits FDV. Le fabricant peut ainsi planifier ces flux en fonction de ces informations.

Les recherches sur l'optimisation de la récupération des produits FDV dans les CLSC sont nécessaires pour rendre viable ce type de chaîne d'approvisionnement (J. Shi, Zhang, & Sha,

2011). En effet, les acteurs de la boucle de retour doivent pouvoir évaluer l'état des produits FDV disponibles pour les réutiliser, les refabriquer ou les recycler.

Nous proposons une méthode pour choisir au mieux le traitement de récupération des produits FDV ainsi qu'une meilleure sélection de ces produits, tout en satisfaisant les demandes des clients, en étant plus soucieux des ressources naturelles et en s'assurant d'un profit généré maximal. Ainsi, l'objectif principal de ce mémoire est le développement d'un outil de gestion du flux des produits, des composants et des matières premières dans une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée.

Ce mémoire est subdivisé en trois chapitres. Dans le chapitre 1, nous présenterons l'Économie Circulaire, une nouvelle manière de penser notre modèle économique pour pallier aux manquements de l'approche linéaire traditionnelle qu'elle suit actuellement. Cette transition vers ce modèle circulaire est entravée par la récupération efficace des produits FDV. Elle doit ainsi s'appuyer sur les outils numériques de l'Industrie 4.0 afin de surmonter cet obstacle. Nous décrirons ensuite le principe de logistique inverse et de chaînes d'approvisionnement en boucle fermée. Nous verrons ensuite les transformations des CLSC avec l'Industrie 4.0 ainsi que les méthodes de résolution des problèmes d'optimisation. Nous présenterons enfin les objectifs de recherches et notre méthodologie. Dans le chapitre 2, nous développerons un modèle de CLSC s'appuyant sur l'IoT. Les points suivants seront développés : la formulation du problème et ses hypothèses, la mise en équation du problème, l'étude d'un cas concret numérique avec optimisation et analyse de sensibilité. Ce deuxième chapitre sera présenté sous forme d'article de revue scientifique avec comité de lecture soumis pour publication dans « Journal of Cleaner Production » La preuve de soumission de l'article se trouve dans l'Appendice I. Cet article est l'amélioration d'un article de conférence publié et disponible dans l'Appendice II. Enfin dans le chapitre 3, nous proposerons une démarche pour établir des modèles de prédictions de l'état des produits en fin de vie.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

1.1.1 Approche linéaire du cycle de vie

Depuis longtemps et aujourd'hui encore, l'économie et notre manière de consommer sont fondées sur un mode de production linéaire. La vie d'un produit est un enchaînement de cinq phases : extraction de la matière première, transformation, distribution, utilisation et élimination. Le parcours de ces cinq étapes est représenté sur la Figure 1.1. Le produit traverse différentes étapes, gagnant ou perdant de la valeur lors de chacune d'entre elles. Dans cette approche linéaire du cycle de vie, la Nature est considérée comme la source des ressources ; et ces flux de matières issus de l'Écosphère, c'est-à-dire l'écosystème planétaire global, ne possèdent pas de limites (Hall C. A. S. & Klitgaard K. A., 2012).

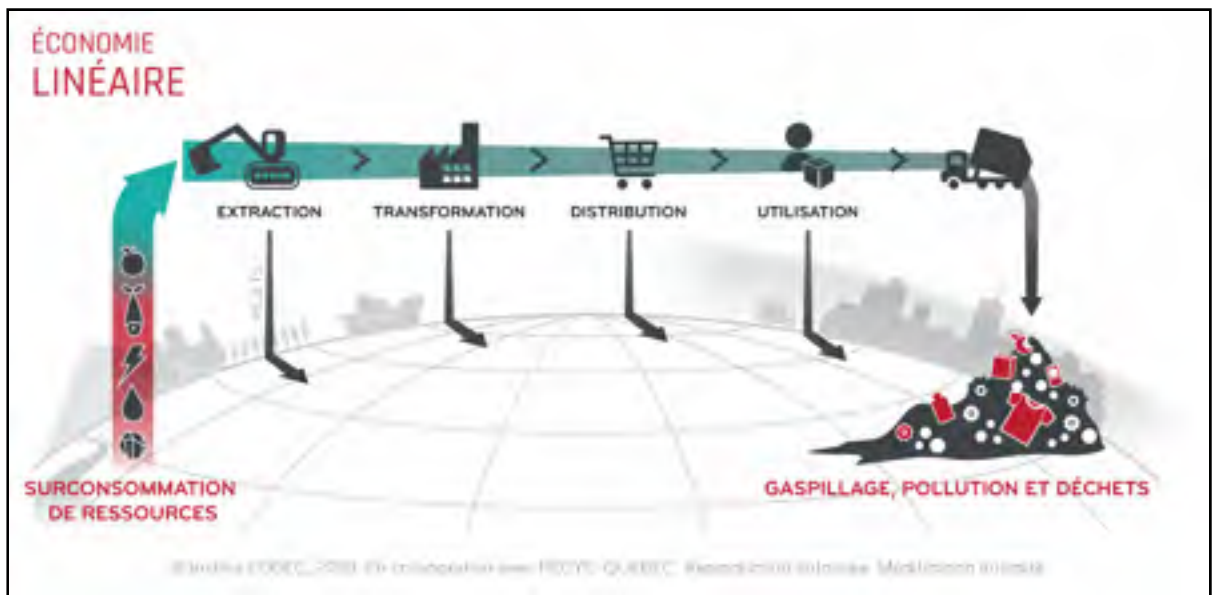


Figure 1.1 Présentation du cycle de vie linéaire des produits (Recyc-Québec, 2019)

Néanmoins, Cette approche linéaire du cycle de vie des produits repose sur une vision incomplète de l'Écosphère et des activités économiques et industrielles. En effet, considérer l'Écosphère comme un fournisseur intarissable de ressource minière et énergétique mène fatalement à un épuisement de celles-ci (Jancovici, 2017). Les conséquences de l'activité humaine sur l'environnement, dans cette approche linéaire, ne sont considérées qu'à la fin de cette chaîne et non dès la source et l'extraction des matières premières.

Ainsi, les perturbations créées par l'activité économique dans ce modèle linéaire sont corrigées par des techniques correctives en fin de chaîne (Tranchant & Vasseur, 2005). Toutes idées d'interdépendance et de circularité des flux sont absentes, chaque phase de vie d'un produit est indépendante des autres au-delà de celles qui ont une connexion directe avec elle. Cela revient ainsi à diminuer les conséquences d'un mal et non à éliminer la cause de celui-ci, ce qui est insuffisant et ne résout pas les problèmes environnementaux sur le long terme. La seule récupération considérée dans l'approche linéaire du cycle de vie des produits est le recyclage des déchets générés par les produits en fin de vie (Skerlos, 2015).

1.1.2 Conséquence de l'approche linéaire du cycle de vie des produits

À partir des années 1970, l'empreinte écologique, c'est-à-dire la surface nécessaire pour satisfaire la demande humaine en ressources naturelles, a dépassé la surface disponible sur Terre pour les fournir et à absorber les déchets générés, la biocapacité. La Figure 1.2 montre l'évolution de l'empreinte écologique et de la biocapacité par habitant ces dernières décennies. Ainsi en 2018, avec une population mondiale de 7.5 milliards d'habitants, l'humanité aurait besoin de 1.7 planète pour ne pas être en déficit écologique (Global Footprint Network, 2018).

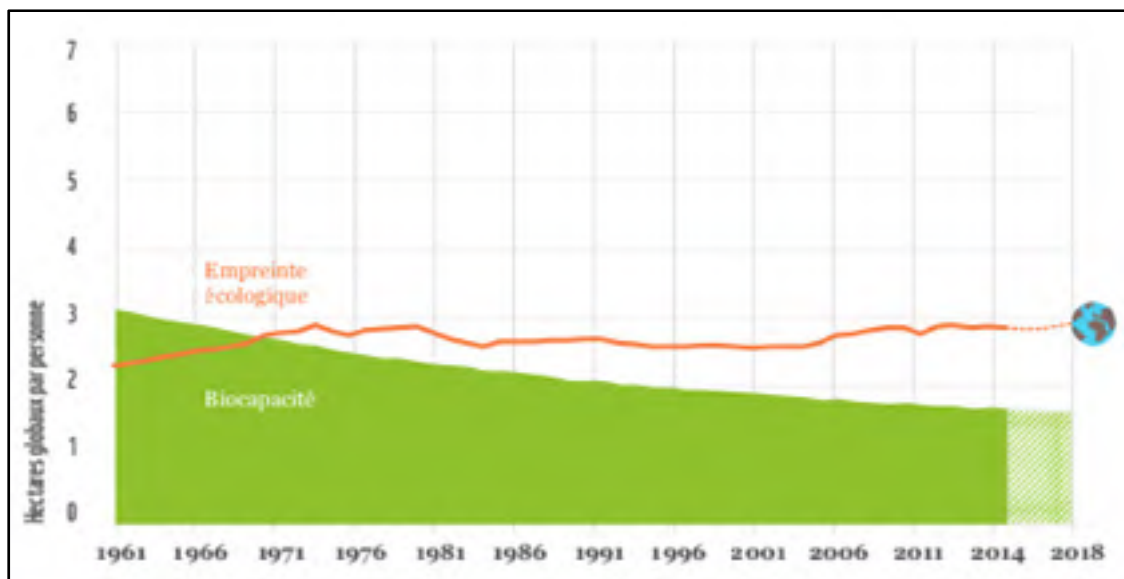


Figure 1.2 Évolution de la biocapacité du monde entre 1961 et 2018 (Global Footprint Network, 2018)

L'économie mondiale devient de plus en plus dépendante des ressources naturelles fossiles et cette surconsommation nous rapproche de plus en plus rapidement de l'épuisement des ressources naturelles par manque de régénération de celles-ci (Toth & Szigeti, 2016). L'approche linéaire de notre mode de consommation et de production ne peut donc pas s'inscrire indéfiniment dans l'écosystème (Graedel, 1996).

1.1.3 La fin de vie des produits

1.1.3.1 La production des déchets

Pour suivre la consommation croissante dans le monde, l'approche linéaire est très exigeante en matières premières primaires, c'est-à-dire en matières premières qui n'ont pas encore été utilisées dans la production d'un produit. Lorsque ce dernier est en fin de vie, ces matières premières deviennent des déchets et de la pollution (voir Figure 1.1). La quantité de déchets devient de plus en plus importante (OCDE, 2020) et constitue une source de nuisances partout

dans le monde depuis la sédentarisation des populations humaines, dans les pays pauvres comme les plus développés possédant des systèmes de traitements (Béguin, 2016).

Ce problème devient de plus en plus important car la quantité de déchets ménagers produits par habitant a été multipliée par 100 entre 1800 et 2017 dans des pays comme la France (ADEME, 2016).

Le recyclage est la méthode la plus répandue pour limiter la quantité de déchet et le gaspillage. C'est une pratique qui est entrée dans les mœurs et est pratiquée depuis des décennies, proposant une solution pour adoucir les conséquences de l'approche linéaire de l'économie (ADEME, 2014).

Le Canada ne fait pas exception de cette augmentation de la quantité de déchets. En effet, entre 2002 et 2016, la quantité de déchets a augmenté de 11%, soit 3,5 millions de tonnes supplémentaires. Pour la gestion des déchets ménagers, le Canada a recours à l'incinération, à l'enfouissement et au recyclage après réacheminement. La quantité de déchets subissant ces traitements a connu une croissance de 4% entre 2002 et 2016, pour un total de 24.9 millions de tonnes. Pour la quantité de déchets recyclé, l'augmentation de 2002 à 2016 est plus conséquente en atteignant 39% et portant le total à 9.3 millions de tonnes. Ainsi, seulement 26% de la quantité totale de déchets est recyclés. Le secteur non résidentiel (construction, industrie, commerce) représentait 59% des déchets éliminés et 48% des déchets recyclés, ce qui montre le retard de l'industrie canadienne dans le réacheminement des déchets (Environnement et Changement climatique Canada, 2018).

La Figure 1.3 montre plus en détail la répartition des quantités de déchets entre ceux résidentiels ou non, ceux recyclés ou non.

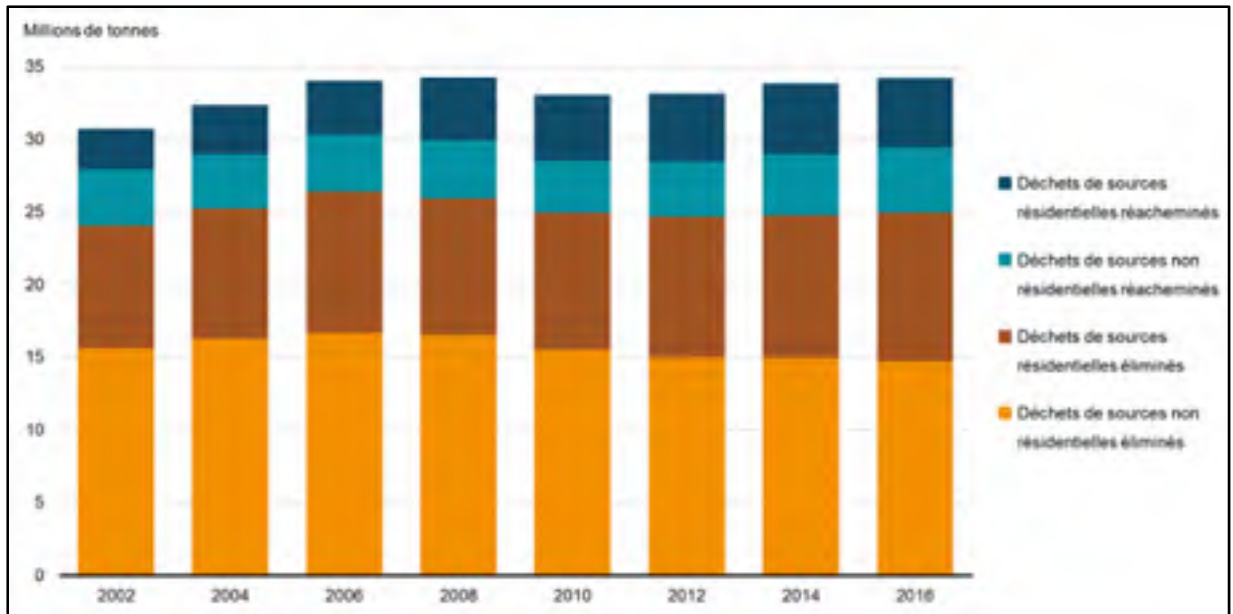


Figure 1.3 Réacheminement et élimination des déchets solides, Canada, 2002 à 2016
(Environnement et Changement climatique Canada, 2018)

En comparaison, en France, 42% des déchets résidentiels sont recyclés, le reste est soit incinéré (32 %), soit enfoui (26 %). L'Agence de la transition écologique française (ADEME) alerte aussi sur le fait que les capacités d'enfouissement diminuent et que donc cette méthode n'est pas viable sur le long terme (ADEME, 2016).

La composition des flux de déchets est extrêmement variée. Par exemple, dans le cas des ordures résidentielles, le flux possède une grande palette de composants comme on peut le voir sur le Tableau 1.1.

Tableau 1.1 Composition des ordures ménagères collectées (ADEME, 2010)

Flux	Déchets putrescibles	Papiers cartons	Plastiques composites	Textiles	Verre	Métaux	Autres
Composition	25,1 %	21,3 %	12,7 %	10,4 %	11,0 %	2,9 %	16,6 %

Cette diversité pose des problèmes de traitements des déchets. La collecte sélective a pour but d'homogénéiser les compositions des flux de déchets mais demande une organisation

permettant de faire le tri avant la récupération des produits (ADEME, 2014). La Figure 1.4 indique la diversité de la composition des déchets canadiens, largement dominée en masse par les déchets organiques et le papier sur les deux dernières décennies (Canada, 2018).

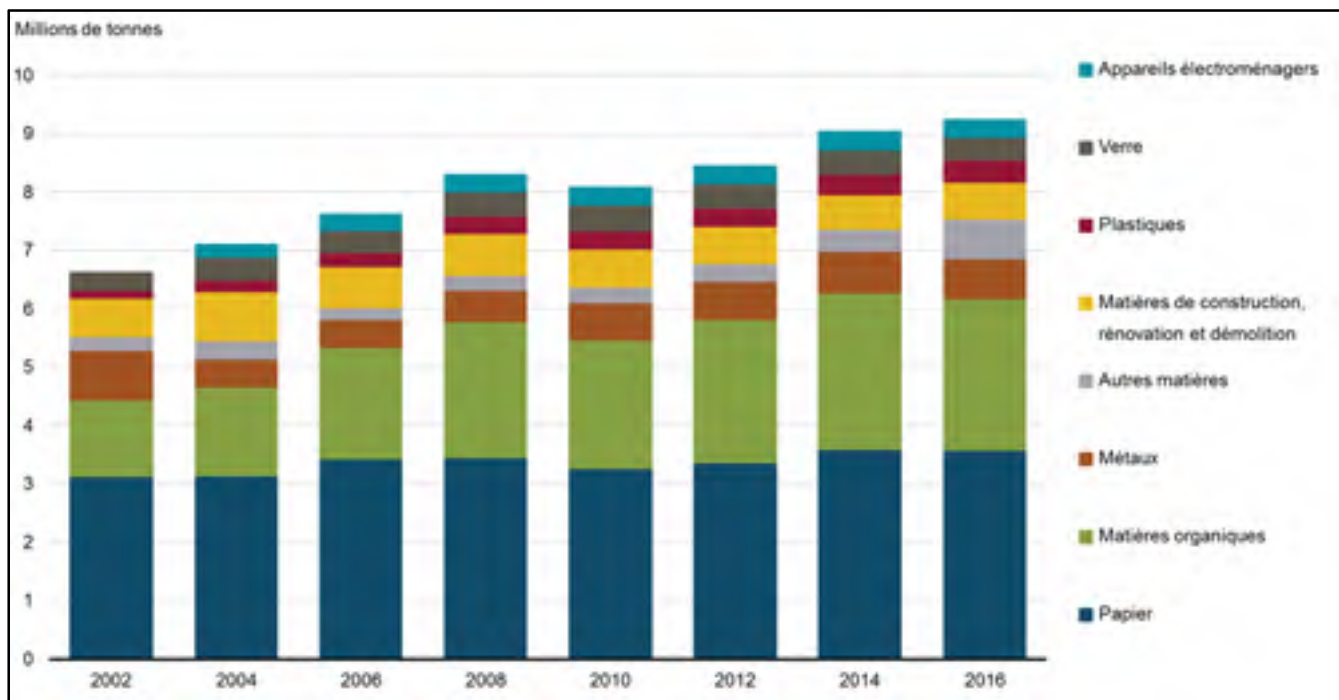


Figure 1.4 Réacheminement des déchets solides selon le type de matières, Canada, 2002 à 2016 (Environnement et Changement climatique Canada, 2018)

Face à une quantité de déchets croissante, l'utilisation des produits FDV comme une source de matière première autre que l'extraction minière est judicieuse, c'est ce qu'on nomme la mine urbaine. La quantité d'énergie pour extraire les minerais urbains par rapport à des minerais dans une mine géologique est faible (Geldron, 2016; Sengupta, 2018).

Le Tableau 1.2 illustre ce propos en opposant les quantités de minerais à haute importance technologique présentes dans les mines urbaines et géologiques, ainsi que les types de déchets électroniques dans lesquels on les trouve.

Tableau 1.2 Teneurs en minéraux de la mine urbaine (Grimaud, 2019)

Minerais	Teneurs moyennes dans les mines géologiques	Teneurs moyennes dans la mine urbaine	Déchets concernés
Or	De 1 à 10 g/t	De 1 à 350 g/t	Cartes électroniques
Argent	De 0,1 g/t à 5 g/t	3 500 g/t	Téléphones portables
Cuivre	De 0,6 à 1 %	De 10 à 15 % De 30 à 50 %	Téléphones portables Câbles électriques
Platinoides*	De 1 à 8 g/t	260 g/t De 100 g/t à 150 g/t	Pots catalytiques Cartes électroniques
Terres rares	De 1 à 15 % (en oxydes)	35 % 5 000 g/t	Aimants permanents Lampes fluocompactes
Indium	De 1 à 100 g/t	175 g/t	Écrans LCD
Cobalt	0,3 %	De 10 à 15 %	Batteries Li-ion
Tantale	250 g/t de Ta ₂ O ₅	3 000 g/t	Téléphones portables
Lithium	0,04 % pour les salars et 1 % pour les mines	1,5 %	Batteries Li-ion

*La famille des **platinoides** regroupe six ou sept éléments chimiques appartenant à la famille des métaux de transition et apparentés dans le tableau périodique : ruthénium (Ru), rhodium (Rh), palladium (Pd), osmium (Os), indium (Ir), platine (Pt), et, selon les sources, rhénium (Re)

Ainsi, en 2007, 3% l'or disponible sur les marchés, 3% de l'argent, 13% du palladium et 15% du cobalt provenait de l'exploitation des mines urbaines (Tansel, 2017). La collecte des produits FDV dans le but de récupérer cette mine urbaine est donc un enjeu majeur.

1.1.3.2 La collecte des produits FDV

La diversité de la composition des déchets demande un tri qui se fait en amont de la récupération. Or, la production d'un déchet se fait le plus souvent à proximité du lieu de sa dernière utilisation. Ainsi les produits FDV sont dispersés sur le territoire, ce qui constitue le principal problème de la récupération, car cela augmente les coûts de traitements notamment pour des produits très nombreux, très disséminés et à faibles coûts unitaires (une canette en aluminium par exemple) (Grimaud, 2019).

Cette organisation pour recycler les déchets demande de sensibiliser les consommateurs afin d'optimiser la collecte. Il s'agit de la limite du recyclage dans l'approche linéaire du cycle de vie des produits. En effet, le recyclage est effectué par le consommateur, avec souvent un appui des autorités gouvernementales, sans connexion avec l'industrie manufacturière (Erkman, 2004). Ce système n'est pas assez performant et les différents acteurs du cycle de vie d'un produit doivent avoir une connexion pour gérer de manière optimale les produits FDV (Arnsperger & Bourg, 2016).

1.1.3.3 Les insuffisances du recyclage

Récupérer les produits FDV n'est pas la seule difficulté à surmonter pour améliorer la gestion des produits FDV récupérés. En effet, comme vu à la section 1.1.3.1, le recyclage est le traitement de récupération le plus courant, mais il n'est pas suffisant.

Premièrement, le recyclage complet des matériaux issus de produits FDV n'est théoriquement pas possible car les lois de la thermodynamique imposent la consommation d'une immense quantité d'énergie pour le réaliser, rendant contre-productif le recyclage (Korhonen, Honkasalo, & Seppälä, 2018). De plus, les opérations de recyclage entraînent aussi des pertes de matières (Stahel, 2013). Cette limitation technologique est notable pour certaines terres rares abondamment présentes dans l'électronique du quotidien (Teigeiro, 2017).

Le recyclage provoque aussi une baisse de fonctionnalité des matériaux recyclés et une perte énergétique dû au processus de recyclage (Perry et al., 2012). Dans le cas des métaux, la phase d'affinage à chaud entraîne la perte d'éléments d'alliage (Ohno et al., 2015; Paraskevas, Kellens, Renaldi, Dewulf, & Duflou, 2013). Certains éléments d'alliages sont complexes à recycler et altèrent considérablement le processus (Gaustad, Olivetti, & Kirchain, 2010).

Plus globalement, les filières de récupération mettent en commun les flux de retour et le traitement des produits FDV, peu importe les compositions des alliages qui les composent. La

fonctionnalité des matériaux métalliques en est alors dégradée (Sakai et al., 2013). Lorsqu'un effort de tri est fait, de possibles erreurs peuvent perturber le recyclage (Hiraki et al., 2011).

Le recyclage ne permet donc pas de réduire complètement les déchets. Des méthodes alternatives sont donc préférables pour traiter les produits FDV. La réutilisation des produits FDV dans un le cadre d'un emploi identique est une option. On peut aussi citer le réusinage des composants pour les remettre à neuf après désassemblage du produit FDV. Ces nouvelles perspectives de traitement sont des alternatives de plus en plus répandues pour compenser les limites du recyclage qui ne permettent pas de réduire l'impact de l'approche linéaire de l'économie. Ces méthodes transforment l'économie, elle n'est plus linéaire et gagne en circularité.

1.2 L'Économie Circulaire

1.2.1 Le développement durable

Nous venons de voir que l'approche linéaire du cycle de vie des produits ne pouvait pas être durable dans un monde où consommation et population augmentent inexorablement. L'épuisement des ressources s'accélère et les dérèglements de l'écosystème impactent de plus en plus fortement l'Humanité (ONU, 2019).

Le concept de développement durable réunit développement économique et préservation de l'Écosphère. Cette expression est apparue en 1987, lorsque l'Organisation des Nations Unies a publié le rapport Brundtland traitant de question environnementale. Le développement durable y est défini de la manière suivante :

Le développement durable est un mode de développement qui répond aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. Deux concepts sont inhérents à cette notion : le concept de « besoins », et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité, et l'idée des limitations que l'état de nos

techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir (Brundtland, 1987).

Cette nouvelle manière d'organiser le développement de la société se réalise dans trois dimensions représentées sur la Figure 1.5 :

- La première dimension est la dimension environnementale. L'activité économique humaine ne doit pas dépasser la capacité de renouvellement des ressources naturelles et perturber l'équilibre des écosystèmes.
- La seconde dimension est sociale : les ressources et les services essentiels qui en découlent doivent être accessibles à tous pour garantir la cohésion des peuples.
- La troisième dimension est économique. La croissance économique qui résulte de la meilleure gestion des ressources garantit la pérennité et la stabilité de la Société.

Il est souvent mentionné d'une quatrième dimension, la gouvernance. Il s'agit de la méthode pour mener collectivement l'application du développement durable, englobant les trois autres dimensions (Combe, 2015). Les combinaisons de ces dimensions permettent à la société de devenir vivable, viable, équitable, et donc durable. Ces combinaisons sont présentées Figure 1.5.

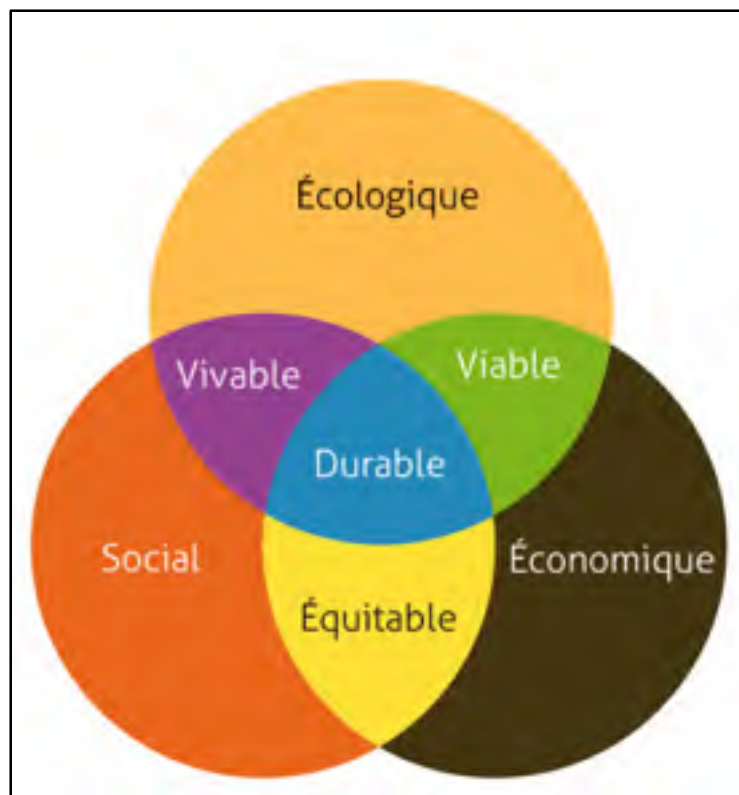


Figure 1.5 Les dimensions du développement durable

Le développement durable a donc posé un concept avant tout sociétal d'une société industrielle plus consciente des problèmes environnementaux causés par une consommation irraisonnée des ressources naturelles et de leurs conséquences sur les populations. On appelle Économie Circulaire (EC) l'aspect plus matérielle du développement durable. On peut donc considérer que le développement durable contient donc l'EC (Grimaud, 2019).

1.2.2 Définition du concept d'Économie Circulaire

Une approche circulaire de l'Économie modifie l'enchaînement des cinq étapes de l'approche linéaire (extraction de la matière première, transformation, distribution, utilisation et élimination) donné à la Figure 1.1. Dans cette dernière étape, chaque phase n'est dépendante de celle qui la précède ou la suit directement. Dans l'Économie Circulaire, toutes ces étapes sont interdépendantes entre-elles grâce à l'intégration d'une boucle de retour permettant de

fermer le cycle. Cette approche circulaire peut être comparée aux cycles naturels des ressources comme le cycle de l'eau (Zhang et al., 2014).

L'Économie Circulaire est ainsi décrite comme un « système de production, d'échange et de consommation visant à optimiser l'utilisation des ressources à toutes les étapes du cycle de vie d'un bien ou d'un service, dans une logique circulaire, tout en réduisant l'empreinte environnementale et en contribuant au bien-être des individus et des collectivités » (Institut EDDEC, 2018).

On distingue deux objectifs principaux de l'Économie Circulaire présenté sur la Figure 1.6 (Recyc-Québec, 2019). Le premier est de reconsidérer notre manière de produire et de consommer afin d'utiliser moins de ressources et protéger les écosystèmes dont elles sont extraites. Plusieurs stratégies peuvent permettre d'atteindre cet objectif. La consommation doit devenir plus responsable et les opérations doivent être optimisées afin de réduire les gaspillages.

En effet, la solution circulaire ne peut contenter les besoins en ressources et l'apport de matières premières serait toujours nécessaire (McDonough & Braungart, 2010). Il est aussi primordial de changer la façon de concevoir les produits afin de réduire l'impact environnemental tout au long de leur cycle de vie, du choix des matériaux, à la fabrication, en passant par son utilisation et en prenant en compte sa fin de vie c'est ce qu'on appelle l'écoconception (Sauvé et al., 2016).

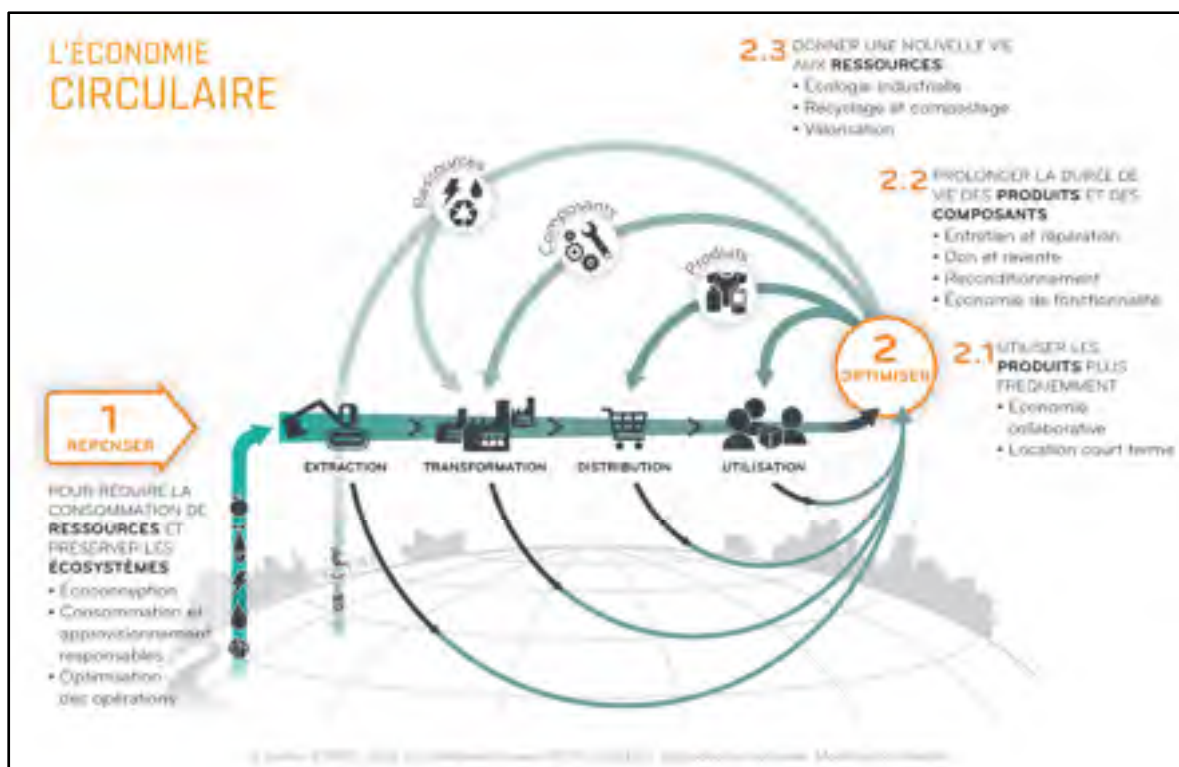


Figure 1.6 Schéma de l'Économie Circulaire (Recyc-Québec, 2019)

Le second est d'optimiser les ressources qui sont déjà utilisées. Pour atteindre cet objectif, plusieurs stratégies sont envisageables. Premièrement les produits peuvent être utilisés plus fréquemment, c'est-à-dire maximiser leur temps d'activité quand ils sont en service. C'est le concept d'économie collaborative. Les produits et services sont partagés par plusieurs entreprises ou individus afin d'optimiser les ressources nécessaires à leur fabrication (Rizos, Tuokko & Behrens, 2017). Des plateformes numériques permettent cette mutualisation des ressources entre différents acteurs. Les entreprises peuvent, dans cet esprit d'échange, louer sur de courtes durées leurs équipements afin que d'autres les utilisent, sans pour autant devoir faire usage de nouvelles ressources pour en créer un nouveau (ADEME, 2014). De la même manière, des espaces de travail partagés s'inscrivent dans l'économie collaborative.

La deuxième stratégie consiste à prolonger la durée de vie des produits et des composants. Réparer un produit qui ne fonctionne plus ou bien revendre/donner un produit dont on n'a plus l'usage sont des manières assez intuitives pour augmenter la durée de vie. On peut aussi citer

le reconditionnement (refurbishing) qui est la remise à neuf d'un produit après l'avoir désassemblé, inspecté, nettoyé, réusiné (remanufacturing) et enfin réassemblé (H. J. Parkinson, 2003; Lieder & Rashid, 2016). Enfin l'économie de fonctionnalité est quant à elle une économie où l'on vend l'utilisation d'un produit et non la possession de ce dernier. L'entreprise qui vend l'usage du produit peut ainsi faire perdurer son utilisation en gérant sa maintenance de la meilleure manière grâce à son expertise et sa connaissance du produit (Haas, Krausmann, Wiedenhofer & Heinz, 2015). On peut citer l'exemple du fabricant du pneu Michelin qui offre maintenant un service d'utilisation au kilomètre de ses pneus à ses clients et assure l'entretien de ceux-ci ainsi que le contrôle de la pression multipliant ainsi la durée de vie du pneu par 2.5 (ADEME, 2014).

La dernière stratégie est le fait de donner une nouvelle vie aux ressources. Le recyclage est la méthode la plus conventionnelle pour réutiliser la matière première et la réinjecter dans un nouveau cycle de vie (Lieder & Rashid, 2016). Le recyclage s'étend aussi aux matières organiques : le compost permet d'obtenir des engrais naturels par exemple. Pour les matières qui ne peuvent être recyclées, on peut les valoriser en les incinérant. La chaleur dégagée permet ainsi de chauffer des locaux (ADEME, 2014). Enfin, l'écologie industrielle, ou symbiose industrielle, est la circulation des matières sortantes et entrantes des entreprises entre-elles. Ainsi, ce qu'une industrie rejette peut constituer le flux de matière entrante d'une autre (Bocken, Miller, Weissbrod, Holgado, & Evans, 2017; Erkwan, 2004; Institut Montaigne, 2016).

1.2.3 Les bénéfices de l'Économie Circulaire

L'Économie Circulaire est donc un concept visant à réduire l'impact écologique des activités humaines. Si les nouvelles contraintes imposées par ce modèle peuvent nuire à certains domaines économiques, la transition vers l'Économie Circulaire apporte de nombreuses retombées positives.

On distingue évidemment des retombées environnementales positives grâce à l'Économie Circulaire. C'est l'objectif principal de cette nouvelle façon de concevoir l'économie.

Les études publiées sont pour le moment essentiellement européennes et se focalisent sur la réduction des gaz à effet de serres ainsi que la récupération et le recyclage des déchets. Il a été calculé qu'optimiser les ressources dans l'alimentation, la fabrication et la métallurgie diminuerait jusqu'à 4% des émissions des gaz à effet de serre (Lawton et al., 2013). Par exemple, le cuivre recyclé émet seulement 35% de la quantité de gaz à effet de serre émise par du cuivre primaire à masse égale (Technopolis Group, 2016). De plus, les processus de fabrication et d'utilisation qui ne sont pas optimisés ont des besoins en matières premières plus importants. L'Économie Circulaire pourrait ainsi réduire les besoins en matières premières de 32% en 2030 et de 53% en 2050. Ces économies seraient acquises en utilisant mieux les produits et les infrastructures. En effet, les voitures sont utilisées seulement pendant 8% de leur vie, les infrastructures de travail sont utilisées 40% du temps et un produit manufacturé est en service en moyenne 9 ans (Fondation Ellen MacArthur, 2015).

Les retombées de l'Économie Circulaire sont aussi économiques tant au niveau de l'augmentation du PIB que de la création d'emplois. La Commission européenne estime qu'une meilleure utilisation des ressources amenant une diminution de 1% du besoin en ressources naturelles engendrerait entre 12 et 23 milliards d'euros et entre 100 000 et 200 000 emplois dans l'Union Européenne (Erkwan, 2004). Une stratégie comme le reconditionnement peut apporter des bénéfices importants. Le prix de ventes des produits pourrait baisser de 20% grâce à des coûts d'approvisionnement et de production diminués respectivement de 70% et 34%. L'Économie Circulaire garantit aussi plus de stabilité pour les entreprises car les matières issues du recyclage et de la récupération des produits en fin de vie diminuent l'impact des cours de matières premières sur celle-ci (Rebaud, 2017).

Les bénéfices de l'Économie Circulaire doivent pourtant être modérés (Wijkman & Skånberg, 2015). En effet, on peut observer des effets rebonds, c'est-à-dire que les bénéfices économiques créés par l'Économie Circulaire provoquent une plus grande consommation,

réduisant ainsi les bénéfices écologiques, voire peut même être néfaste pour l'écosystème (Korhonen et al., 2018; Zink & Geyer, 2017).

1.2.4 Transition vers l'Économie Circulaire

Bien que les bénéfices soient multiples dans de nombreux domaines, la transition vers l'Économie Circulaire n'en est qu'à ses débuts. Le traitement des produits en fin de vie est la clé de cette transition (S. Sauvé, D. Normandin & M. McDonald, 2016). Cela demande de repenser l'organisation complète des filières de récupérations des produits en fin de vie car pour le moment leur retour n'est pas suffisant pour assurer la pérennité d'un modèle circulaire (Allwood, 2014). Les acteurs de la récupération des produits FDV ont donc pour objectifs (Grimaud, 2019) :

- Optimiser la collecte des produits FDV tant en quantité qu'en qualité.
- Choisir les traitements de récupération en fonction de l'état des produits FDV.
- Conserver la quantité et la qualité des matières premières.

Passer vers un modèle circulaire demande nécessairement une meilleure gestion des ressources pour réduire les effets sur l'environnement en augmentant la fonctionnalité des ressources dans le temps grâce à toutes les options possibles pour les produits FDV autre que l'élimination : réutilisation, réparation, désassemblage, reconditionnement ou bien recyclage. Les économies réalisées grâce à cette meilleure utilisation des ressources doivent être réinvestis dans des technologies qui permettraient de rendre plus rentables cette nouvelle politique industrielle et de créer des emplois (Lavery, Pennell, Pennell, & Evans, 2014).

Ainsi, l'Économie Circulaire est un concept qui est certes défini, mais dont la mise en application réelle en est encore à ses débuts. L'Économie Circulaire est devenue une des priorités de nombreux pays à travers le monde (Gouvernement du Canada, 2018), tant au niveau des politiques gouvernementales à grande échelle, que des entreprises civiles menant

des initiatives plus petites. Beaucoup de défis doivent encore être à réaliser pour que l'Économie Circulaire soit complètement adoptée (Smart Prosperity Institute, 2018).

On peut alors se demander quels outils technologiques permettront cette transition. L'Industrie 4.0 est un moyen de la réaliser car elle offre des solutions pouvant renforcer le modèle circulaire de l'Économie, notamment en améliorant les différentes stratégies envisagées dans la partie 1.2.2 comme la réutilisation, le reconditionnement ou le recyclage. Les technologies de l'Internet des objets pourraient aussi aider à optimiser la collecte des produits FDV (Rajput & Singh, 2019). Dans la prochaine partie, nous allons donc présenter plus en détail l'Industrie 4.0 pour cerner tous ses aspects qui permettraient de transiter vers l'Économie Circulaire.

1.3 L'Industrie 4.0

Les sociétés humaines ont traversé au cours du temps trois révolutions industrielles et commencent la quatrième en ce moment même. La chronologie des révolutions industrielles est résumée sur la Figure 1.7. La première a eu lieu vers 1780 et se caractérise par la mécanisation de l'Industrie avec des machines fonctionnant à l'eau et à la vapeur. La seconde révolution industrielle se déroula plus d'un siècle plus tard avec l'avènement des chaînes de montage et l'électrification de l'industrie. Enfin, la troisième révolution se passa dans les années 1970 avec les débuts de l'automatisation des chaînes de production et l'apparition des systèmes informatiques.

Ces trois révolutions ont successivement transformé notre manière de produire et de consommer. Avec les avancées technologiques en matière de numérique, l'industrie manufacturière commence aujourd'hui sa quatrième révolution industrielle pour répondre aux nouveaux besoins industriels (Schwab, 2017).

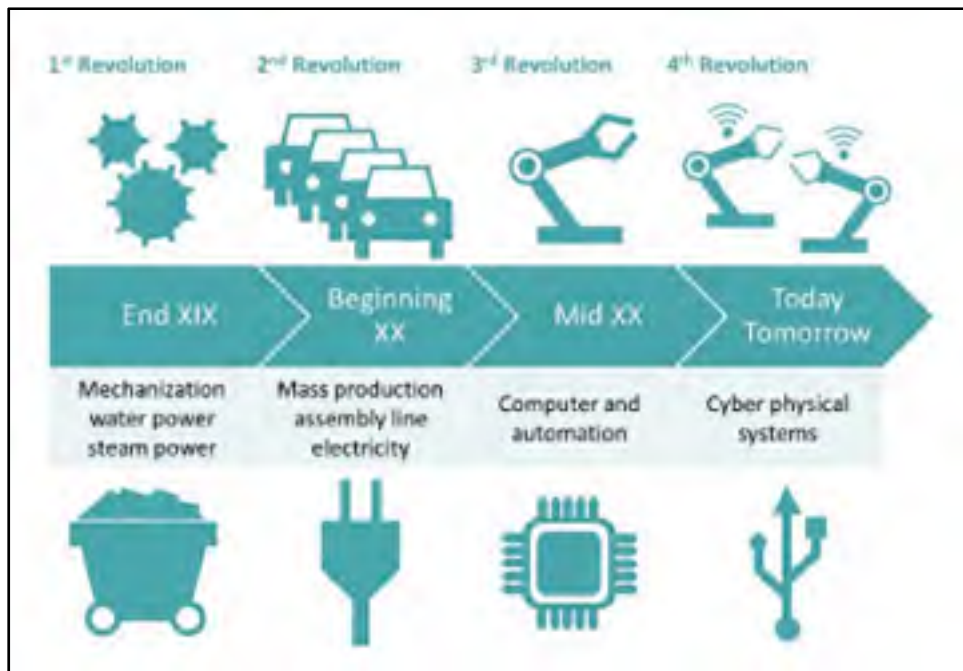


Figure 1.7 Chronologie des quatre révolutions industrielles (Hof, 2018)

1.3.1 De nouveaux enjeux industriels

Les marchés deviennent de plus en plus complexes, en évolution permanente et de plus en plus concurrentiels (Brettel, Klein, & Friederichsen, 2016). L'imprévisibilité des prévisions, de la production et de l'innovation demandent aux industriels de faire preuve d'une flexibilité plus importante que par le passé (Spena, Holzner, Rauch, Vidoni, & Matt, 2016) afin de répondre aux besoins variables des clients, aux nouvelles technologies qui renouvellent l'offre et à des produits toujours plus nombreux (Lafou, Mathieu, Pois, & Alochet, 2016). La personnalisation des produits devient une exigence récurrente de la part des clients (Cantamessa & Capello, 2009) : l'individualisation des produits devient progressivement la norme dans la plupart des secteurs de l'économie comme cela était attendu depuis des décennies (Da Silveira, 2001). Cette individualisation devient si avancée qu'on préfère désormais parler de personnalisation de masse.

Cette personnalisation entraîne des lots de plus petites tailles, plus difficiles à produire de manière économique car elle s'oppose aux processus de fabrication traditionnels pensés pour

des lots de tailles importantes. L'impact stratégique de cette flexibilité est discuté depuis presque trente ans dans la littérature (Gerwin, 1993). Des systèmes de fabrication flexibles (FMS) s'appuyant sur des machines-outils à commandes numériques et pilotés par des processus de manutention et de stockage automatisés grâce à des systèmes informatiques intégrés ont été développés pour faire face à ce défi (Mahmood, Karaulova, Otto, & Shevtshenko, 2017). Les FMS sont dépendants des changements rapides des configurations et instructions d'usinage propres à chaque pièce fabriquée par le manufacturier. La flexibilité de fabrication n'est pas la seule exigence à satisfaire, la flexibilité de sur la taille des lots et sur la livraison est aussi nécessaire. Les manufacturiers doivent être capables de fabriquer une variété de composants avec le même équipement, en faisant varier la productivité et en étant capable de respecter et de raccourcir les délais de livraison. (Oke, 2005). La fabrication est considérée comme l'aspect le plus compliqué à rendre flexible (Mahmood et al., 2017).

La prochaine évolution de cette personnalisation de masse est l'intégration du client à la conception et à la fabrication des produits à la fois en choisissant parmi une liste d'options (Koren, Hu, Gu, & Shpitalni, 2013), ce qui demande une flexibilité encore plus importante (Mourtzis & Doukas, 2014).

Pour répondre à ces nouvelles exigences, l'Industrie 4.0 est née en Allemagne en 2011 (Kagermann, Lukas, & Wahlster, 2011). Cette industrie se fonde notamment sur l'Internet des Objets (IoT) afin de connecter les systèmes de production tout au long de la chaîne d'approvisionnement avec des usines intelligentes (Thoben, Wiesner, & Wuest, 2017). L'industrie manufacturière doit s'appuyer sur l'Industrie 4.0 pour produire des produits plus personnalisés tout en restant compétitifs économiquement (Deloitte, 2015).

L'Industrie 4.0 est l'intégration et la collaboration de systèmes basés sur les données récupérées lors de chaque étape de la chaîne de valeur d'un produit. On peut définir cette collaboration comme verticale, car elle a lieu à chaque niveau d'une entreprise. En effet, toutes les informations au niveau de la gestion à la production sont transmises et analysées dans le

but de réagir à tous les niveaux en fonction des variations de demandes, de stocks ou de capacités de productions (Dalenogare, Benitez, Ayala, & Frank, 2018).

Cette collaboration est aussi horizontale : les données circulent entre les différents acteurs de la chaîne d'approvisionnement, y compris parfois entre des entreprises concurrentes, afin que chacun puisse s'adapter aux besoins ou difficultés des autres (Hahn, Krautkremer, Hartmann, & Wachendorf, 2014). Cette collaboration permettrait de diminuer les coûts et d'augmenter la flexibilité et la productivité des entreprises, ainsi que de satisfaire pleinement le besoin de personnalisation de plus en plus fort des clients.

1.3.2 Les outils de l'Industrie 4.0

L'avancée principale de l'industrie 4.0 est donc l'intégration des technologies de l'information dans les systèmes industriels (Dalenogare et al., 2018; Wagire, Rathore, & Jain, 2019) utilisant l'IoT (Ghobakhloo, 2018; Haddud, DeSouza, Khare, & Lee, 2017). Les différents outils de l'Industrie 4.0 sont présentés sur la Figure 1.8.

On parle aussi de l'Internet des Objets industriels (IIoT). Il s'agit d'un système qui communique et interagit avec l'ensemble des systèmes d'une entreprise. Elle permet de suivre en temps réels l'activité de chacun de ces systèmes et de les commander après avoir analysé la situation (Gunasekaran, Subramanian, & Tiwari, 2016). L'IIoT permet aux entreprises de collaborer entre elles en automatisant les prises de décisions au sein de la chaîne d'approvisionnement et ainsi optimiser le fonctionnement de chacune d'entre-elles (Hahn et al., 2014; Manavalan & Jayakrishna, 2019).

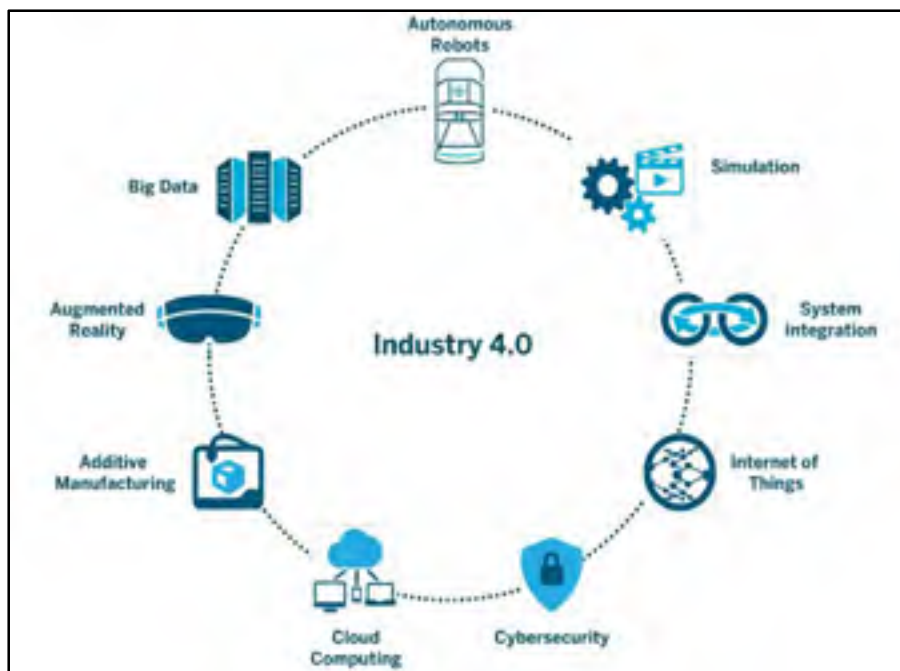


Figure 1.8 Les outils de l'Industrie 4.0 (INSA Stasbourg, 2018)

L'IIoT permet la collecte d'une quantité gigantesque de données, aussi appelées Big Data. L'analyse de données est donc nécessaire pour que ce volume croissant de données récoltées soit utilisé afin d'optimiser la production (Wamba et al., 2017). Les entreprises analysent en effet leurs données dans le but d'accroître les performances et l'efficacité de leurs processus afin de répondre aux critères de flexibilité et de personnalisation (Ghobakhloo, 2018). Expertiser des données collectées devient progressivement la manière la plus courante pour prendre des décisions rapidement au sein d'une entreprise (Ghadge, Er Kara, Moradlou, & Goswami, 2020). L'IIoT se manifeste physiquement dans les usines avec des systèmes cyberphysiques, c'est-à-dire des systèmes physiques (produits, machines, etc) où des technologies comme des capteurs, des puces d'identification par radiofréquence (RFID) ou bien des microprocesseurs permettent de connecter les mondes physiques et virtuelles (Siemens AG, 2017).

Ces grandes quantités de données récoltées sur l'ensemble des systèmes et capteurs présents doivent être stockées. La technologie des nuages permet la récupération et le stockage en temps réels de ces données sur des serveurs distants (Ghadge et al., 2020). Le partage des données

entre les différents acteurs de la chaîne d'approvisionnement est un facteur essentiel pour améliorer les performances de l'industrie. Les chaînes d'approvisionnement deviennent plus intelligentes grâce à ces données (Oztemel & Gursev, 2018).

Les données récupérées peuvent aussi servir à alimenter des simulations pour analyser toutes les éventualités possibles, à chaque étape de la vie d'un produit et de la chaîne d'approvisionnement (Zhong, Xu, Klotz, & Newman, 2017). De cette manière, on peut tester et optimiser les processus afin d'améliorer chacun des points de la production avant de les appliquer concrètement dans l'usine (PwC, 2016).

Les connaissances acquises grâce aux données doivent améliorer concrètement les processus de production industrielle. La robotique a été implémentée il y a plusieurs décennies dans de nombreux domaines comme la logistique ou la fabrication pour améliorer la productivité (Demetriou, 2011). Aujourd'hui, les robots sont désormais capables d'interagir entre eux, on parle alors de robotique autonome ; et avec les opérateurs humains, il s'agit de cobotique (contraction entre les mots collaboratif et robotique) (Devy, 2012). Ces avancées métamorphosent les usines dans le but de les rendre plus productives et plus sécuritaires. On parle aussi d'usine intelligente, ou de Smart Factory (Ghadge et al., 2020).

Pour gagner en flexibilité, les méthodes de fabrications plus traditionnelles comme la fonderie ou l'usinage ne sont plus suffisantes. L'émergence de la fabrication additive et de l'usinage hybride offrent des nouvelles opportunités pour concevoir et fabriquer des produits en petits lots et répondant aux exigences et besoins précis du client (McKendrick, 2015 ; Ghadge et al., 2018). La combinaison de ces différentes techniques permet d'accumuler leurs avantages et permet d'être plus performant au niveau de la vitesse, de la durabilité, de l'agilité et de la satisfaction des exigences du client (Iqbal et al., 2020).

L'implantation de nouvelles méthodes et procédés dans les espaces de travail entraînent nécessairement un nouvel aménagement de ceux-ci. La réalité augmentée peut considérablement aider dans des tâches comme l'aménagement d'une usine ou d'un entrepôt.

Elle peut aussi accompagner les opérateurs dans des opérations de maintenance ou de contrôle (Vaidya, Ambad, & Bhosle, 2018).

La multiplication de technologies informatiques au sein des entreprises crée des problèmes de cybersécurité. Il s'agit aussi d'un enjeu important de l'Industrie 4.0 : des stratégies contre le piratage informatique et le vol de données doivent être pensées au sein des entreprises (Deloitte, 2015; Oztemel & Gursev, 2018). Nous sommes actuellement dans cette quatrième révolution industrielle et le champ des possibilités grâce aux technologies numériques n'ont pas encore été toutes explorées, notamment dans le domaine de l'Économie Circulaire comme nous allons le voir par la suite.

1.3.3 L'Industrie 4.0 au service de l'Économie Circulaire

La quatrième révolution industrielle, la révolution par les outils numériques, est une conséquence d'une évolution des exigences des consommateurs exigeant une personnalisation de masse des produits. Les différents outils qui ont émergés avec l'Industrie 4.0 peuvent aussi servir la mise en place de l'Économie Circulaire. La littérature a ainsi étudié l'impact de l'Industrie 4.0 sur les différentes stratégies de l'Économie Circulaire : le recyclage, le reconditionnement et la réutilisation.

Pour le recyclage, le tri des déchets doit se faire précisément dans le but d'obtenir une matière première pure en sortie. Ce tri peut s'effectuer avec à l'aide d'une intelligence artificielle qui par l'intermédiaire de robot améliore cette étape de tri (Fondation Ellen MacArthur, 2014). Pour le reconditionnement, Philips propose un système intelligent de gestion d'un éclairage public. Lorsqu'un éclairage demande des opérations de reconditionnement qui vont prendre quelques jours, il n'y a pas besoin de le remplacer. En effet, les éclairages sont connectés par RFID et vont adapter leur puissance si un équipement à proximité a été temporairement enlevé. De cette manière Philips gagne en coût de matière première et d'équipement neuf car ils peuvent se permettre de reconditionner (Foundation, McKinsey, & Stiftungsfonds, 2015). Pour la réutilisation, la Big Data et l'IoT peuvent faciliter les opérations de maintenance

prédictive et préventive en délivrant des informations sur la condition du produit. De cette manière, on prolonge sa durée de vie en retardant sa mise hors service (Bressanelli, Perona, & Saccani, 2018).

Ces exemples montrent que l'Industrie 4.0 peut permettre de faciliter la mise en place des stratégies de l'Économie Circulaire. Cependant, les recherches qui montrent que l'Industrie 4.0 pourrait jouer un rôle d'initiateur de l'Économie Circulaire sont peu nombreuses. Ce rôle peut être joué par l'Industrie 4.0 en créant des produits connectés échangeant des données par l'IoT. En effet, l'analyse de ces données permettrait de surveiller le produit au cours de sa vie, déterminer son état de dégradation, et donc d'optimiser la récupération des déchets. De cette manière, l'Industrie 4.0 pourrait contrôler et optimiser la chaîne d'approvisionnement de retour des produits. L'Économie Circulaire serait alors construite sur une chaîne d'approvisionnement durable. Ainsi l'impact du contrôle des chaînes d'approvisionnement par l'IoT est encore largement inconnu (Uçar, Dain, & Joly, 2020). Cela s'explique notamment par le fait que la prévision de l'état de dégradation d'un produit au cours de sa vie n'est pas une chose maîtrisée (Turan, Ğsmaïl, Hadi, Panos, & Belkıs). Cet asservissement de la chaîne d'approvisionnement, composée d'une chaîne directe et d'une boucle de retour, lie Économie Circulaire et Industrie 4.0.

1.4 Un problème de logistique inverse

L'Économie Circulaire a pour objectif une utilisation plus intelligente des ressources qui ont été extraites par le passé pour limiter l'apport en matières premières primaires épuisables, tout en assurant le développement économique à travers le monde (Stahel, 2013; Wijkman & Skånberg, 2015). Ce modèle circulaire est un appel à la transformation des modèles d'affaires, à l'apparition d'une nouvelle manière de concevoir les produits et à l'élaboration de nouveaux services (Fondation Ellen MacArthur et al., 2015). L'industrie manufacturière en vient donc à se poser cette question : les produits en fin de vie chez les clients sont-ils récupérables ou non ?

Il a été vu dans la section 1.2.4 que l'optimisation des flux de produits en fin de vie depuis les consommateurs est une clé de l'Économie Circulaire (Grimaud, 2019; Lieder & Rashid, 2016), c'est-à-dire les flux qui vont à contre-sens de la chaîne d'approvisionnement classique.

Ainsi, dans un contexte d'Économie Circulaire, il faut tout aussi bien considérer les activités traditionnelles des chaînes d'approvisionnement que les activités de récupération des produits en fin de vie afin de leur redonner de la valeur. C'est ce qu'on appelle la logistique inverse (Fleischmann, Beullens, Bloemhof-Ruwaard, & Van wassenhove, 2001). Cette logistique inverse est devenue une considération importante de la part des gestionnaires des entreprises (Camara, 2019).

1.4.1 Les différents types de logistiques inverses

Dans le domaine de la logistique inverse, on en distingue deux types : la logistique inverse en boucle ouverte et la logistique inverse en boucle fermée (Yotat, 2017).

1.4.1.1 La logistique inverse en boucle ouverte

Lorsque les produits en fin de vie ne sont pas récupérés par le fabricant original (Original Equipment Manufacturer, OEM) mais par un fabricant indépendant (Independent remanufacturers, IR), on parle de logistique inverse en boucle ouverte. Les produits récupérés peuvent être utilisés pour créer des produits identiques ou non, Ce type de logistique est très répandu sur le marché de l'électronique comme le marché des téléphones cellulaires (Geyer & Doctori Blass, 2009)

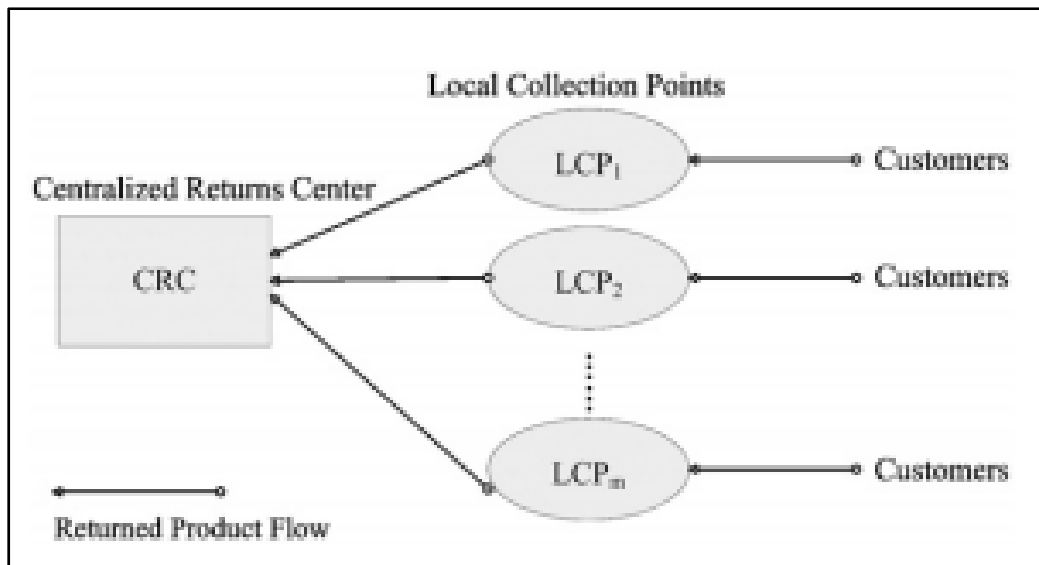


Figure 1.9 Exemple d'un réseau de logistique inverse en boucle ouverte (Gou, Liang, Huang, & Xu, 2008)

Pour illustrer la logistique inverse en boucle ouverte, la Figure 1.9 présente une chaîne d'approvisionnement inversée à boucle ouverte avec un unique centre de retour (CRC) centralisant les collectes de plusieurs centres de collecte (LCP) (Gou et al., 2008).

1.4.1.2 La logistique inverse en boucle fermée

Au contraire, la logistique inverse en boucle fermée correspond au cas où les produits en fin de vie sont collectés par l'OEM ou bien par une autre entreprise jouant un rôle dans la chaîne d'approvisionnement comme un fournisseur de matières premières par exemple (Chouinard, 2003). Les ressources sont de cette manière conservées au sein de la chaîne d'approvisionnement, celle-ci devenant durable et répondant aux besoins futurs de notre société.

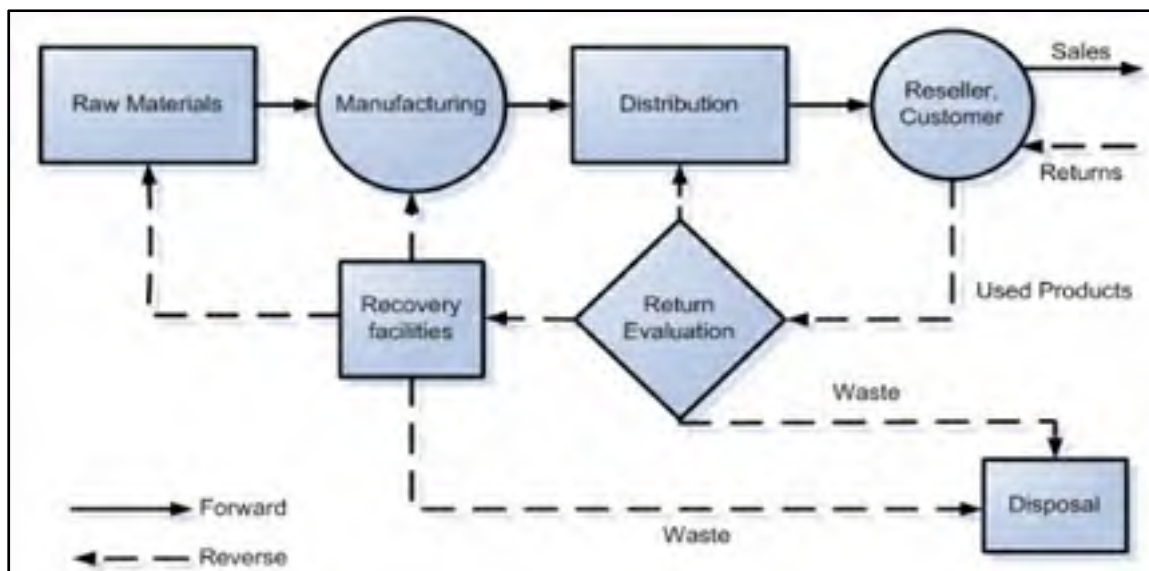


Figure 1.10 Exemple du réseau d'une chaîne d'approvisionnement en boucle fermée (Tonanont, Yimsiri, Jitpitaklert, & Rogers, 2008)

La Figure 1.10 est un exemple de chaîne d'approvisionnement en boucle fermée (Closed-loop supply chain, CLSC). Le revendeur retourne les produits en fin de vie directement dans la chaîne d'approvisionnement. En effet, après inspection et évaluation, le produit retournera au distributeur sans opération de réparation ; ou au fabricant et au fournisseur de matière première après des opérations de récupérations (Tonanont et al., 2008). Dans la suite de ce mémoire, nous intéresserons au CLSC uniquement car ce sont elles qui permettent une meilleure récupération des produits en fin de vie, produits, composants et matières premières récupérés étant traités par les fabricants originaux (Khor & Udin, 2011).

1.4.2 Une nouvelle conception de la logistique inverse

La logistique inverse devient progressivement un poids important dans les prises de décisions stratégiques (c'est-à-dire à long-terme) des entreprises grâce aux aspects économiques, environnementaux et sociaux du développement durable qui en découlent. Ces trois composantes, économiques, sociales et environnementales doivent être prises en compte dans la conception de la chaîne d'approvisionnement (Chardine-Baumann & Botta-Genoulaz,

2014). La logistique inverse doit aussi évoluer avec les nouveaux outils numériques disponibles de nos jours.

1.4.3 Impact de l'Industrie 4.0 sur les CLSC

Nous avons vu dans la section 1.3.2, l'Industrie 4.0 s'appuie sur des outils et technologies avancées métamorphosant les usines et leurs processus vers des systèmes plus intelligents. Les CLSC évoluent aussi grâce à l'Industrie 4.0 en se numérisant pour être plus flexible et résistantes aux variations. La gestion des chaînes d'approvisionnement (supply chain management, SCM) est en effet renforcée : l'IoT permet de partager les informations des différents fournisseurs, de connecter les espaces de stockages des produits et composants, de tracer les flux durant les transports ou la fabrication, de vérifier l'état de produits périssables grâce à des capteurs de températures (Manavalan & Jayakrishna, 2019). Cette numérisation participe à une meilleure planification de la production (Ghobakhloo, 2018; Hofmann & Rüsch, 2017).

Le partage des données récoltées entre les différents acteurs de la chaîne d'approvisionnement est de plus en plus important même si son impact a encore peu été quantifié (Tjahjono, Esplugues, Enrique, & Peláez-LourIoT, 2017). Néanmoins, il est reconnu que cette synchronisation des informations réduit les coûts en chaque point de la chaîne et améliore son efficacité et son adaptativité (Frank, Dalenogare, & Ayala, 2019; Ghobakhloo, 2019). Le contrôle numérique en temps réels des équipements améliore aussi les performances de la chaîne d'approvisionnement et réduisent les risques (Luthra & Mangla, 2018).

Il existe néanmoins dans la littérature des études conceptuels et empiriques aidant stratégiquement les industriels à faire la transition vers des systèmes de logistiques inverses et des CLSC en les aiguillant dans leur adaptation aux nouvelles technologies. Govindan et al. (2017) ont mis en évidence un manque important de recherche sur les CLSC sur les aspects tactiques (à moyen-termes) et opérationnelles (à court-termes) des entreprises. En effet, sur leur sélection de 24 articles publiés dans « Journal of Cleaner Production » et traitant de CLSC,

ils abordaient tous l'aspect stratégique, 4 considéraient l'aspect tactique, et 2 seulement l'aspect opérationnel. Govindan et al. (2017) ont aussi souligné le manque de considération simultanée des différents traitements des produits FDV possibles dans un contexte d'Économie Circulaire. Aucun article ne traite de toutes les possibilités en même temps ; un seul en considère deux : le recyclage et le reconditionnement ; les autres n'en traitent aucun en particulier.

De plus, Govindan et al. (2017) critiquent le fait que moins de 5% des articles abordent des modèles d'optimisation, maximisant les profits, pour aider concrètement à la prise de décision des entreprises. Il apparaît ainsi comme nécessaire de proposer ce genre de modèle pour aider les entreprises. Ces modèles mathématiques optimisant les gains doivent tout d'abord reposer sur des simulations, puis les chercheurs devront essayer d'obtenir des résultats empiriques par l'implantation de technologies digitales (Rajput & Singh, 2019).

En effet, l'émergence des technologies de capteurs embarqués et de l'IoT sont des outils importants pour améliorer les performances de la chaîne d'approvisionnement dans un contexte de fabrication circulaire. Par exemple, les systèmes intelligents de reconditionnement et de démantèlement peuvent planifier de manière optimale la récupération en fonction des demandes des clients. L'IoT est utilisé dans un modèle pour déterminer la durée de vie restante des produits en fin de vie et des composants qui ont été retournés (Ondemir & Gupta, 2014). D'autres systèmes ont été proposés pour évaluer les variantes de conception des produits en fin de vie afin de faciliter le démontage et la reconstruction à l'aide de l'IoT. Le modèle résolu fournit le nombre total de produits de fin de vie démontés, réusinés, stockés, recyclés et éliminés pour chaque type de conception (Joshi & Gupta, 2019).

Ce modèle n'a qu'un seul objectif économique, à savoir l'optimisation des profits. Des modèles à deux objectifs ont été mis au point pour maximiser la fiabilité des produits remanufacturés et minimiser les coûts de traitement en évaluant la qualité des produits retournés (Jiang et al., 2016). D'autres modèles de planification de la production des CLSC visent à réduire les coûts

et la consommation d'énergie en fonction des informations recueillies sur la récupération (Govindan, Mina, Esmaili & Gholami-Zanjani, 2020).

Les CLSC peuvent ainsi optimiser les objectifs économiques, énergétiques ou qualitatifs des industries. Un outil d'aide à la décision a été développé pour faire la transition vers un système en boucle fermée permettant de classer l'état actuel des opérations de réusinage et d'identifier et de prioriser les opérations de l'entreprise qui nécessitent des actions d'amélioration (Golinska, Kosacka, Mierzwiak, & Werner-Lewandowska, 2015).

Cependant, les différents modèles de CLSC existants dans la littérature ne considèrent pas simultanément le recyclage des matières premières, la différence entre les produits neufs et réusinés, les inventaires et la gestion de produits multiples dans un contexte d'Industrie 4.0. Dans la section suivante, nous chercherons à améliorer ce modèle de CLSC en tenant compte des limites énoncées juste avant, et ainsi proposer un modèle de CLSC utilisant des technologies intelligentes qui reflèterait davantage la réalité industrielle.

1.4.4 Techniques de modélisation et de résolution des problèmes de réseaux manufacturiers

La modélisation et la résolution des problèmes des systèmes de logistiques inverses et des CLSC peut se faire par de nombreuses techniques plus ou moins appropriées selon le contexte précis de l'étude. Deux techniques de modélisation peuvent être mises en évidence, celles qui considèrent les incertitudes sur les données récoltées avec des approches stochastiques et celles qui sont déterministes en utilisant la programmation linéaire ou mixte (Govindan, Soleimani, & Kannan, 2015).

On distingue ainsi sept grandes catégories de méthodes (Camara, 2019) :

- Les méthodes analytiques utilisées pour des problèmes de petites tailles.
- Les méthodes de résolution exacte utilisant des solveurs comme LINGO ou CPLEX.
- Les méthodes d'approximation pour de l'optimisation stochastique.

- Les méthodes heuristiques utilisées pour des problèmes de grandes tailles.
- Les méthodes expérimentales pour résoudre des problèmes concrets avec des incertitudes.
- Les méthodes de résolution multi-objectifs utilisant divers solveurs.
- Les méthodes pour l'ordre de priorité par similarité à la solution idéale (TOPSIS) pour des problèmes plus spécifiques.

Chacune de ces méthodes possèdent des forces et des faiblesses. Par exemple, pour la résolution d'un problème de conception de chaîne d'approvisionnement multi-produits, un algorithme génétique est plus rapide qu'une résolution par programmation linéaire avec LINGO pour un problème avec un grand nombre d'entités (nombres de clients, d'usines, de centre de distribution, de fournisseurs etc).

Ainsi, dans le cas d'un problème avec 50 clients, 15 centres de distributions, 10 usines, 3 produits et 2 fournisseurs de matières premières, LINGO fournit une solution après 1353 secondes alors que l'algorithme génétique en obtient une après 146 secondes. À l'inverse, la programmation linéaire à l'aide de LINGO est plus performante pour des problèmes à faible nombre d'entités (Bahrapour, Safari, & Taraghdari, 2016).

La programmation mixte déterministe est donc plus limitée mais est une méthode très adaptée pour la résolution de problèmes de taille plus réduite de gestion de CLSC, et c'est d'ailleurs la méthode privilégiée dans la littérature (Govindan et al., 2015). Nous utiliserons ainsi par la suite cette méthode pour résoudre les problèmes posés dans ce mémoire. Un des programmes LINGO utilisés dans la suite de ce mémoire est visible en Annexe I.

1.5 Conclusion

1.5.1 Résumé de l'analyse critique de la littérature

Au cours de la revue de littérature, nous avons pu mettre en exergue différentes lacunes dans la recherche. Nous pouvons d'abord constater que l'Économie Circulaire est encore très conceptuelle sur beaucoup de points et ses réalisations réelles sont rares.

Les technologies numériques de l'Industrie 4.0 commencent à faire avancer les choses. Elles peuvent déjà faciliter l'application des principes de l'Économie Circulaire, en permettant un meilleur tri des déchets par exemple. Mais l'Industrie 4.0 pourrait faire plus, ses technologies lui permettraient d'être l'initiateur de l'Économie Circulaire. En effet, l'IoT offrant un moyen de suivre les produits durant leur vie et de prédire leur état de dégradation, il serait possible de contrôler la chaîne d'approvisionnement de retour de manière optimale. La prévision de l'état des produits FDV avec l'IoT n'a pas encore été étudiée sur des cas concrets. Ce contrôle des CLSC se révèle comme le pont entre Industrie 4.0 et Économie Circulaire.

Cependant, les conséquences d'un tel contrôle des CLSC par l'IoT n'ont pas encore été étudiées en détail : les recherches à propos des CLSC réalisées à ce jour se limitent à des conseils stratégiques sur le long-terme. De plus, elles ne fournissent pas aux industriels des modèles d'optimisation concrets, illustrés par des études de cas, et qui se concentrent sur la dimension opérationnelle de la gestion de la chaîne d'approvisionnement. Enfin, les CLSC étudiées ne considèrent quasi systématiquement qu'un seul moyen de récupération comme le recyclage, le reconditionnement ou la réutilisation; et non l'ensemble de ces possibilités en parallèle.

1.5.2 Problématiques et objectifs de recherche

La motivation première de ce travail est le défi que représente la réutilisation des produits en fin de vie afin de les réinjecter sur le marché en leur redonnant le plus efficacement de la valeur.

On proposera ainsi une utilisation plus intelligente des ressources naturelles, tout en augmentant sa compétitivité industrielle. Cela nécessitera une amélioration de la chaîne d'approvisionnement, en particulier du domaine de la logistique inverse. Nous évoquerons par la suite un problème de planification multi-produits et multi-périodes dans une CLSC visant un objectif économique.

Suite à l'étude de la littérature, la problématique principale est de voir comment l'Économie Circulaire est bénéfique avec l'optimisation des flux des produits en fin de vie qui reviennent au fabricant, ainsi que leur sélection. Cette optimisation découlera des données récupérées sur les produits pendant leur vie grâce à l'IoT. En effet, il n'existe pas à ce jour de modèle d'optimisation des opérations de récupération de produits FDV, dans une CLSC, basée sur l'IoT, et considérant l'ensemble des stratégies de récupération de l'Économie Circulaire.

C'est à ce niveau que se situe la nouveauté du travail réalisé. Ce mémoire étudie l'intégration des technologies de l'Industrie 4.0 dans les modèles de chaînes d'approvisionnement en boucle fermée considérant explicitement toutes les options possibles de traitement de récupération des produits en fin de vie, en particulier la refabrication.

L'autre problématique mis en évidence est de déterminer comment il serait possible de prévoir la dégradation d'un produit tout au long de son cycle de vie afin de choisir le meilleur traitement de récupération parmi le recyclage, le reconditionnement et la réutilisation.

Ce présent mémoire proposera ainsi de développer un modèle de prise de décision de la planification au niveau opérationnelle, pour la récupération des produits en fin de vie afin d'optimiser les CLSC dans le contexte de l'Industrie 4.0. Cette planification opérationnelle sera considérée sur des périodes de quelques jours pour des produits en fin de vie disponibles. Nous étudierons le comportement de ce modèle face à différents cas de figure. Nous verrons aussi comment il serait possible d'obtenir des modèles prédictifs de l'état de dégradation des produits FDV dans le but de les récupérer plus intelligemment.

1.5.3 Méthodologie

Pour atteindre ces objectifs et répondre aux problématiques, nous adopterons la méthodologie suivante constituée de six étapes :

- La première étape est la définition du réseau de la CLSC et de ses différents échelons (fournisseurs, fabricant, centre de distributions et de collectes).
- La deuxième est la création d'un moyen de contrôle des produits durant leur vie pour tracer l'évolution de leur état.
- La troisième est l'écriture du modèle mathématique qui régit le comportement de la CLSC développée.
- La quatrième est l'étude de la sensibilité du modèle mathématique pour tester sa robustesse et évaluer son comportement face à des variations, notamment à travers l'étude d'un cas industriel concret et réaliste.
- La cinquième consiste à optimiser le modèle de CLSC en déterminant la meilleure sélection des produits FDV.
- La dernière étape sera la proposition d'une démarche pour prédire l'état de dégradation des produits en fin de vie.

Les cinq premières étapes seront traitées dans le chapitre 2, sous la forme d'un article soumis pour publication dans « Journal of Cleaner Production ». La dernière étape sera abordée dans le chapitre 3, présentant les grands axes de la démarche et ouvrant des fenêtres de recherche pour le futur.

CHAPITRE 2

CIRCULAR MANUFACTURING 4.0: TOWARDS INTERNET OF THINGS EMBEDDED CLOSED-LOOP SUPPLY CHAINS IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 4.0

Victor Delpla^a, Lucas A. Hof^b, Jean-Pierre Kenné^c

^{a, b, c} Département de Génie mécanique, École de Technologie Supérieure, 1100 Notre-Dame
Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C 1K3

Article soumis pour publication dans « Journal of Cleaner Production », 31 juillet 2020

2.1 Abstract

Increased global economic competition and growing importance of environmental issues force manufacturers to consider implementation of closed-loop supply chains (CLSCs) ensuring recovery of end-of-life products (EOL) for recycling or reuse. Such CLSCs are subject to many uncertainties in their flows given the varying conditions of EOL products. In the era of Industry 4.0, developments in the field of the Internet of Things (IoT) allow the collection of data throughout product life cycles to determine most optimal treatments to apply after product recovery and to plan the CLSC flows with less uncertainty. This study proposes a CLSC model maximizing the total profit of the manufacturing company by choosing the treatment to be applied to the collected products according to their condition as estimated by life cycle data collection enabled by IoT. A mixed integer linear programming (MILP) model is considered for several completely modular products sharing common components, and for several components sharing their raw material compositions. To validate the proposed CLSC model on an actual innovative real-world application, we used a modular smartphone, the Fairphone 2, as case study. Our developed model shows that if the remanufactured product demand represents 40% of the demand, the total profit could increase by 36% when selling remanufactured products from randomly recovered EOL products; and profit could increase

by 48% if EOL products are optimally selected considering their condition. Deploying this approach, the input of primitive raw materials would be reduced, which saves natural resources. This study indicates that being more conscious of ecological problems does not infringe with the need of businesses to achieve higher profits.

Keywords: Close-loop supply chain, Sustainable supply chain, Internet of Things, Industry 4.0, Remanufacturing, Circular Economy, Circular Manufacturing

2.2 Introduction

Management and recovery of end-of-life (EOL) products has become an important issue in industry due to the growing importance of environmental issues and the exhaust of some natural resources. It also serves as a new way for industry to increase its profits in a world of increasing competition. Indeed, returns management, recycling and pollution reduction are new business opportunities for many industries (Cannella, Bruccoleri, & Framinan, 2016). Circular Economy (CE) is a concept that can solve these problems (Prieto-Sandoval, Jaca, & Ormazabal, 2018; Turner & Pearce, 1992). It would allow the world economy to earn nearly 1000 billion US dollars per year and at the same time enable sustainable economic and environmental development (Korhonen et al., 2018). The CE is not limited to the recycling of raw materials, but encourages the reuse, remanufacturing and recycling of EOL products as shown in Figure 2.1. Globally, the CE also aims for a more faire social economy and a better quality of life for future generations (Kirchherr, Reike, & Hekkert, 2017).

However, research on CE concepts generally focuses on the benefits to the economy as a whole and do not necessarily propose specifically how this can be achieved in a manufacturing reality referred to as circular manufacturing (CM). Such CM systems are specifically designed for closing the loop of products and/or components preferably in their original form, through multiple lifecycles. This is a value management approach that includes the phases of value creation, delivery, use, recovery and reuse in a systemic perspective (Asif, 2017; Blomsma et al., 2019). This new manufacturing perspective takes these phases systematically into account,

using recycling, disassembly and remanufacturing processes (Nascimento et al., 2019), which is outlined in Figure 2.1.



Figure 2.1 Circular Economy flows and processes

Awareness on the relevance of research on management and recovery of EOL products in the context of Industry 4.0 is emerging, however only few literatures exist on the connection between Industry 4.0 and Circular Economy towards circular manufacturing (Rahman, Perry, Müller, Kim, & Laratte, 2020). Launched in Germany in 2011, Industry 4.0 refers to the fourth industrial revolution emerged by new digital technologies and the intelligent interaction between physical objects without human intervention, driving manufacturing companies to move from mass production to mass customization and even mass-personalization in extreme cases (Sukhodolov, 2019). Industry 4.0 tools aim to increase the flexibility and productivity of manufacturing factories, especially in a world where mass customization of products has become essential to satisfy customer demand (Shohin, Rooss, Ray, & Xun, 2019). Closed-loop supply chains (CLSCs) are a solution for adapting circular manufacturing to real cases in industry. Product tracking during manufacturing, use and recovery is essential to optimize the recovery process and planning. Reverse logistics enable the collection of EOL products from consumers to improve profitability, stability and durability (Temur & Bolat, 2012). Reverse

logistics should be applied from design to recovery by the manufacturer (Guarnieri, e Silva, & Levino, 2016), which is an effective way to increase the fraction of used products returned to the plant in order to protect the environment (Soleimani & Govindan, 2014). Deployment of CLSCs enables improved levels of recovery of used products and results in a better choice of recovery processing (P. Shi, Yan, Shi, & Ke, 2014). Industry 4.0 has the potential to considerably improve CLSCs by increasing the connectivity and data transfer across the entire supply chain using systems such as the IoT, offering improved product tracking during use to circumvent inspection operations after recovery, creating new opportunities for remanufacturing. However, as EOL technologies can greatly benefit from the technological advances of the Industry 4.0 concept, these technologies tend generally to be underdeveloped compared to upstream (manufacturing) technologies (Reck & Graedel, 2012).

This study aims to contribute in addressing the research gap on the connection between Industry 4.0 technology and circular manufacturing concepts. We propose a CLSC profit optimization plan using a linear programming model making use of IoT and considering all possible recovery options for several EOL products.

After a comprehensive literature review, we will define the problem statement resulting in the research questions for this study. Subsequently, a novel CLSC model will be developed approaching real-world industrial systems, based on deployment of IoT for product tracking and then propose our CLSC's optimization. We will then assess a case study based on modular smartphones (e.g. Fairphone) to study the sensitivity of the developed model. Finally, an improvement of the model will be proposed allowing further optimization of the supply chain.

2.3 Literature review

In order to propose a CLSC aiming to improve CE models while optimizing the generated profit, we need to identify the processes for recovering EOL products and its obstacles allowing this reverse logistics, to understand how IoT can improve the reverse logistics, and to study existing CLSC models.

2.3.1 Recovery processing

Different processes are possible for EOL products to avoid disposal. The simplest treatment is reuse. Reuse consists of using the EOL products as received after cleaning, i.e. without any reprocessing (H. J. Parkinson). Reuse is the most effective strategy for preserving natural resources (Lo & Yu, 2013). Recycling is the recovery of materials and is not the most preferable option for recovering the residual value of a product or component because one loses all the added value of a product during its manufacture. The recyclability of a product depends on the materials of which it is made and the ability to separate them from each other (Bakker, 2015).

Until recently, the recovery of raw materials by recycling and disposal were the main processes for treating an EOL product. Remanufacturing is now a possible processing option for recovered products and components (Jiang et al., 2016). This is the process of restoring used products to conditions equivalent to those of a new product through disassembly, cleaning, repair and reassembly (Chari, Dialo, & Venkatadri, 2014). Obstacles to remanufacturing are of various types, both at the level of the manufacturer and the customer (Lundmark, Sundin, & Björkman, 2008).

Recovery treatments for EOL products such as remanufacturing have become more accessible than before with the development of technologies such as additive manufacturing. For example, it is possible to repair turbine blades by direct laser deposition, which is more cost effective than manufacturing a new blade (Wilson, Piya, Shin, Zhao, & Ramani, 2014). Despite some logistical problems, the recovery of EOL products has the potential to create sustainable value. The different indicators of this value are increased sales, competitiveness, new sales opportunities, reduced environmental impact, reduced use of primary raw materials and the creation of new jobs (Jensen, Prendeville, Bocken, & Peck, 2019). In order to assess the viability of remanufacturing, tools and methods have been developed. Key factors have been identified at the economic, environmental and social levels (Goodall, Rosamond, & Harding, 2014). Taking into account the above issues, it seems necessary to explain the concept of

Circular Economy to potential customers. They need to be aware of their role in a circular manufacturing system. In the following part of this study, we will propose a CLSC that considers these different recovery treatments and targets to go beyond the limits of remanufacturing and reverse logistics.

Trends, factors and barriers to reuse, recycling and remanufacturing have been identified in the literature. One of the main challenges is the need to trace products during their manufacture, use and recovery. IoT and embedded sensors can enhance the supply chain by tracking such information (Matsumoto, Yang, Martinsen, & Kainuma, 2016).

2.3.2 IoT and embedded sensors

The IoT and the use of integrated sensors to control the product life cycle are emerging and considered promising by many research studies (Manavalan & Jayakrishna, 2019). The integration of sensors on products permitted to count the quantities of products around the collection sites allowing to optimize the recovery (Lee & Chan, 2009). Radio Frequency Identification (RFID) systems allowing such product counting can solve the main challenges of closed-loop logistics (Kumar & Chan, 2011). The EOL product condition is also affected by uncertainties. Sensors embedded in products reduce these uncertainties by using information collected during the life of the product (Du, Cao, Chen, & Wang, 2013). This information, collected and stored on RFID tags, improves the recovery of EOL products (Vadde S, 2008), notably by improving recycling and disassembly with an exchange of information between the manufacturer and the recovery company (Nowakowski, 2018). These sensors also improve the reverse supply chain by detecting missing components before disassembly (Ilgin & Gupta, 2011). Linear programming models using the IoT are available to provide an optimal solution for disassembly and remanufacturing, embedded sensors providing the remaining life of the recovered product. These models are single-objective models focusing on an economic objective (Ondemir, Ilgin, & Gupta, 2012). Finally, the information collected on products during their life cycle using IoT has an impact on reducing transport costs in the supply chain (Bryan & Srinivasan, 2014). IoT and embedded sensors have the potential to

improve the recovery of EOL products by focusing on specific aspects such as the remaining life of the product, its disassembly or its location in relation to collection points. However, the link between the collection of an EOL product, its state of degradation and its recovery treatment has not yet been studied.

2.3.3 Existing CLSCs models

The emergence of embedded sensor technologies and IoT are important tools for improving supply chain performance in a circular manufacturing context. For example, smart reconditioning and dismantling systems can optimally plan recovery based on customer demands. IoT is used in a model to determine the remaining life of end-of-life products and components that have been returned (Ondemir & Gupta, 2014). Other systems have been proposed to evaluate design variants of EOL products to facilitate disassembly and reconstruction using the IoT. The resolved model provides the total number of EOL products disassembled, remanufactured, stored, recycled and disposed of for each design type (Joshi & Gupta, 2019).

This model has only one economic objective of profit optimization. Two-objective models maximizing the reliability of remanufactured products and minimizing processing costs by evaluating the quality of returned products have been developed (Jiang et al., 2016). Other CLSC production planning models aim to reduce costs and energy consumption based on the recovery information collected (Govindan, Mina, Esmaeili, & Gholami-Zanjani, 2020).

CLSCs can therefore optimize the economic, energy or quality objectives of industries. A decision-support tool has been developed to make the transition to a closed-loop system to classify the current condition of remanufacturing operations and to identify and prioritize the company's operations that require improvement actions (Golinska, Kosacka, Mierzwiak, & Werner-Lewandowska, 2015).

Turan et al. (2016) propose a model of CLSCs considering the remanufacturing and disposal of a single modular product and its components. An overview of this CLSC is summarized in Figure 2.2 and will be considerably expanded in the following study.

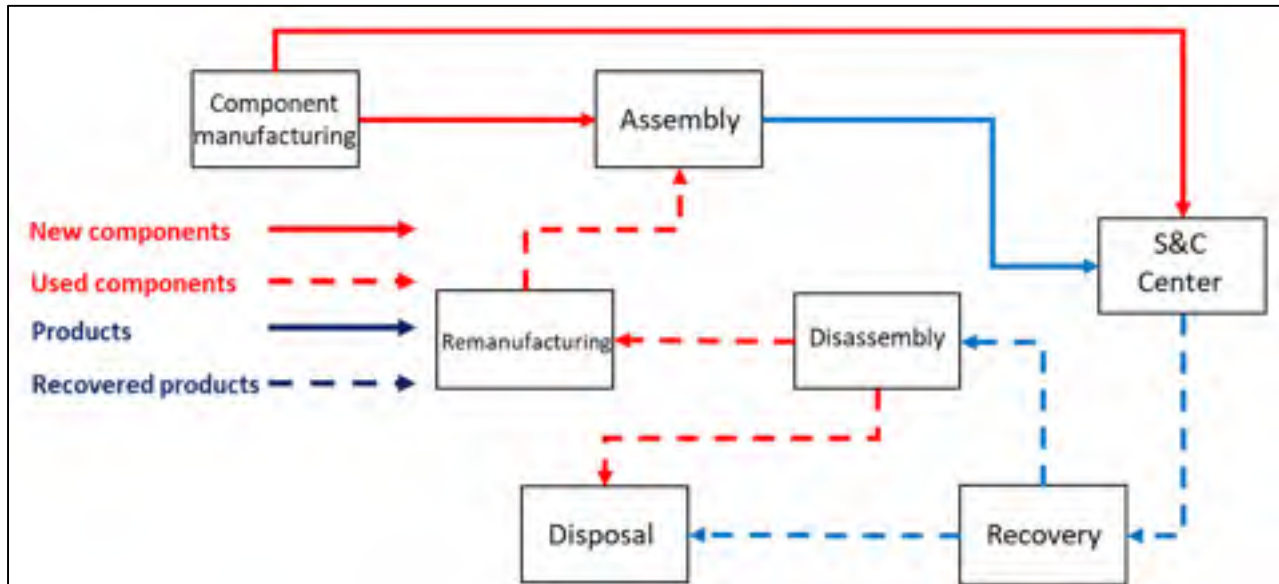


Figure 2.2 CLSC model considering the remanufacturing and disposal of a single modular product and its components

The processing followed by the recovered products and components depends on their conditions, which are evaluated by a synthetic number. This number is determined by data collected with sensors, measuring various usage parameters, and stored on a RFID tag fixed on the product. The author (Turan et al., 2016) called this facility the “Device Internet of Things (DIOT)”. This model allows decision-making on CLSC flows to maximize profit and meet the product demand.

However, the different CLSC models existing in literature do not simultaneously consider the recycling of raw materials, the difference between new and remanufactured products, inventories and the management of multiple products in an Industry 4.0 context. In the following section, we will seek to improve this CLSC model by addressing the limitations

stated just before, and thus propose a CLSC model using smart technologies (here: IoT) that would be a closer reflection of industrial reality.

2.4 Problem statement

This study concerns a manufacturing CLSC with a range of N different products ($n = 1, \dots, N$) that aims to satisfy the demand of a sales and collection centre (S&C centre). The N products are made from J separate components ($j = 1, \dots, J$), manufactured with a total of K ($k = 1, \dots, K$) raw materials. During each of the T periods ($t = 1, \dots, T$) studied, I_n end-of-life products n ($i = 1, \dots, I_n$) are recovered. The products, components and raw materials can be sold at the S&C center. A schematic overview of the developed CLSC model for this study is presented in Figure 2.3. The different direct and reverse supply chain flows for products, components and raw materials are presented respectively in blue, red and green, while the different process stages crossed by these flows are shown inside the blocks.

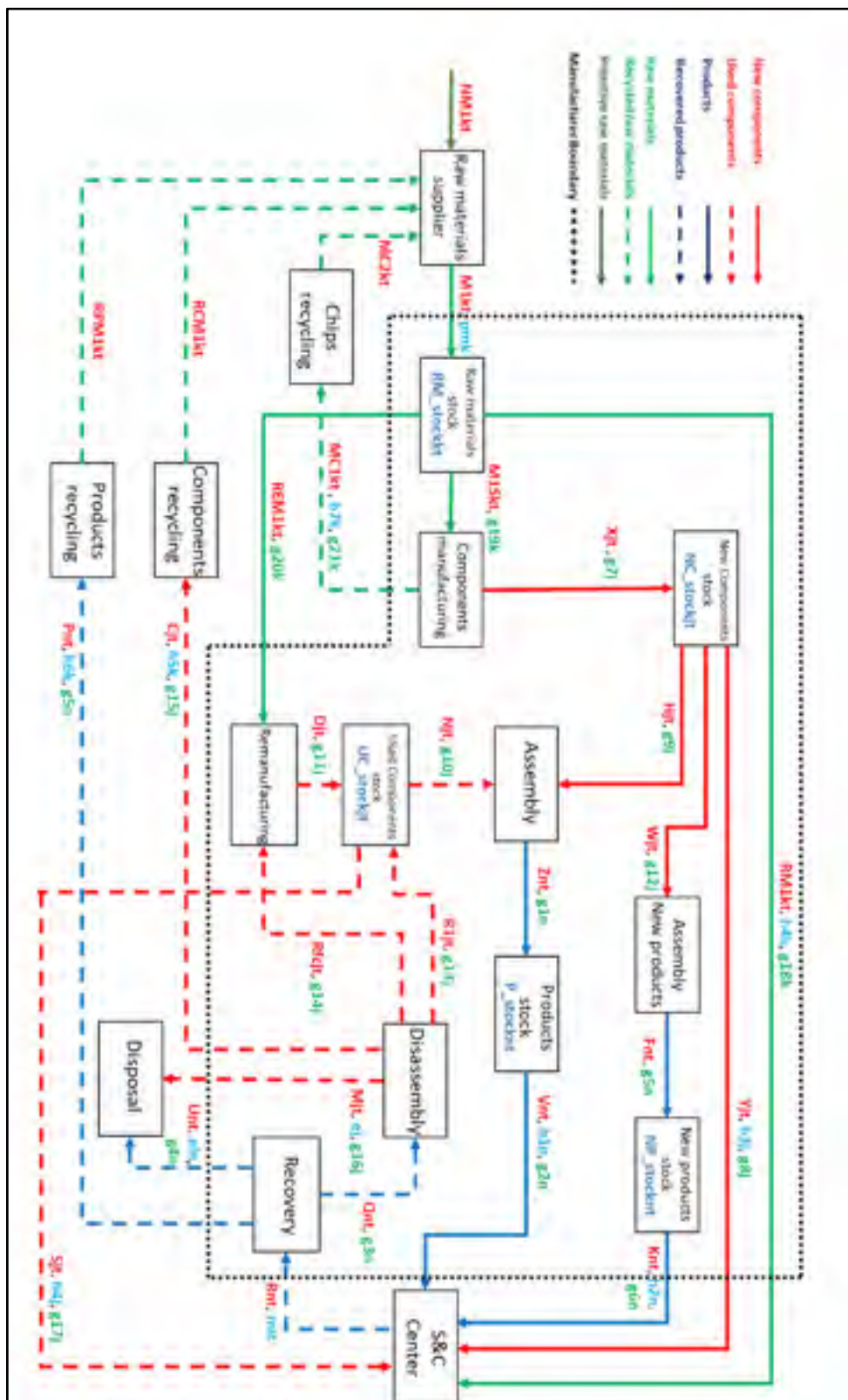


Figure 2.3 CLSC model developed in the study

2.4.1 Objectives

Three recovery options for products will be considered: disassembly, recycling and elimination. If the product is disassembled, the components can undergo four processing options: reuse, remanufacturing, recycling or disposal. Products, components and raw materials are sold or stored to meet S&C centre.

The model intends to answer the following two research questions:

- 1) What recovery processing should be chosen for the products and components returned for each period to maximize the profit of the CLSC?
- 2) How many, and which recoverable products should be purchased to satisfy the remanufactured product and component demands?

2.4.2 Assumptions

In order to define the boundaries of our developed model, we consider the following assumptions:

- A component can be used for different products.
- Primitive raw materials and recycled raw materials are considered of the same quality.
- Production capacity is sufficient.
- All information about sales, transport, storage and manufacturing costs is known.
- The cost of integrating Internet of Things technologies is not considered (we will be interested in products that already have sensors and communication devices).
- The return of end-of-life products is done through a collection center that takes care of this task. It is considered that the user can bring his product back to the collection center on his own. The cost of recovering the product depends on its state of degradation.

2.4.3 Nomenclature

The different parameters and variables of the CLSC model are explained below in Table 2.1 and Table 2.2.

Table 2.1 Problem parameters of the developed CLSC model

Parameters	Description
el_n	Disposal cost of a product n
a_n	Assembly cost of a product n
d_n	Elimination cost of a product n
$cn_{n,j}$	Number of component j in product n
$cw_{n,j}$	Component j importance weight
$h1_n$	Sales price of a product n with used components
$h2_n$	Sales price of a product n with only new components
$dmn_{n,t}$	Product n with only new components demand of the S&C center in period t
$dm_{n,t}$	Product n demand of the S&C center in period t
$g1_n, \dots, g5_n$	Transportation cost of product n
scp_n	Product n storage cost
PSM_n	Maximal product n stock
$diot_{n,i,t}$	DIOT of the i product n recovered in period t
$ni1, ni2$	Threshold value of $diot_{n,i,t}$
rpa_n	Total manufacturing cost of the parts in product n separately
rma_n	Value of the raw materials present in the product n after recycling
$r_{n,i,t}$	Purchasing cost of the product (i,n) in period t from the S&C center
e_j	Elimination cost of component j
m_j	Manufacturing cost of component j
$n_{j,k}$	Number of raw materials k in a component j
$rn_{j,k}$	Number of raw materials k to remanufacture a component j
$h1_j$	Sales price of a new component j
$h2_j$	Sales price of a used component j

Table 2.2 (suite) Problem parameters of the developed CLSC model

$dms_{j,t}$	New components j demand of the S&C center in period t
$dmc_{j,t}$	Used components j demand of the S&C center in period t
$g6_j, \dots, g17_j$	Transportation cost of new component j
scc_j	Composant j storage cost
$NCSM_j$	Maximal new component j stock
$UCSM_j$	Maximal component j stock
$diot_{n,i,j,t}$	diot of component j recovered in period t
$nj1, nj2, nj3$	Threshold value of $diot_{n,i,j,t}$
$f_{n,i,j,t}$	Remanufacturing cost
rp_k	Recovered part of raw material k on products
rc_k	Recovered part of raw material k on components
$cm_{j,k}$	Raw material k lost in the machining of component j
pm_k	Purchasing cost of raw material k from the raw materials supplier
$h4_k$	Sales price of raw material k for the S&C center
$h5_k$	Sales price of raw material k from components recycling
$h6_k$	Sales price of raw material k from products recycling
$dm_{k,t}$	Raw material k demand of the S&C center in period t
$g18_k, \dots, g21_k$	Transportation cost of raw material k
scm_k	Raw material k storage cost
$RMSM_k$	Maximal raw material k stock

Table 2.3 Problem decision variables of the developed CLSC model

Decisions variables	Description
$F_{n,t}$	Number of products n with only new components sent to the stock in period t
$K_{n,t}$	Number of products n with only new components sent to the stock in period t
$Z_{n,t}$	Number of products n sent to the stock in period t
$V_{n,t}$	Number of products n sold to the S&C center in period t
$R_{n,t}$	Number of products n sent to recovery in period t
$Q_{n,t}$	Number of products n disassembled in period t
$U_{n,t}$	Number of products n eliminated in period t
$P_{n,t}$	Number of products n recycled in period t
$NPS_{n,t}$	Number of new products n in stock in period t
$PS_{n,t}$	Number of products n in stock in period t
$X_{j,t}$	Number of new components j manufactured in period t
$Y_{j,t}$	Number of new components j sold to S&C center in period t
$S_{j,t}$	Number of used components j sold to S&C center in period t
$W_{j,t}$	Number of new components j sent to the stock in period t
$H_{j,t}$	Number of new components j sent to assembly in period t
$D_{j,t}$	Number of used components j sent to the stock in period t
$N_{j,t}$	Number of used components j sent to assembly in period t
$C_{j,t}$	Number of components j recycled in period t
$Rfc_{j,t}$	Number of components j remanufactured in period t
$RI_{j,t}$	Number of components j reused in period t
$M_{j,t}$	Number of components j eliminated in period t
$NCS_{j,t}$	Number of new components j in stock in period t
$UCS_{j,t}$	Number of used components j in stock in period t
$NMI_{k,t}$	Number of primitive raw material k entering in the supply chain in the period t

Table 2.4 (suite) Problem decision variables of the developed CLSC model

$MI_{k,t}$	Number of raw material k purchased in the period t
$RCMI_{k,t}$	Number of raw material k recycled from components in period t
$RPMI_{k,t}$	Number of raw material k recycled from products in period t
$RMI_{k,t}$	Number of raw material k sold to S&C center in period t
$REMI_{k,t}$	Number of raw material k sent to remanufacturing in period t
$MCI_{k,t}$	Number of raw material k in machining chips in period t
$MC2_{k,t}$	Number of raw material k recycled from machining chips in period t
$MIS_{k,t}$	Number of raw material k used for the components manufacturing in period t
$RMS_{k,t}$	Number of raw materials k in stock in period t
$dvc1_{n,i,j,t}$, $dvc2_{n,i,j,t}$, $dvc3_{n,i,j,t}$	Auxiliary decision variable used to determine the value of $reun_{n,i,j,t}$, $reun_{n,i,j,t}$ and $rec_{n,i,j,t}$ (takes the value 0 or 1)
$dvp1_{n,i,t}$, $dvp2_{n,i,t}$	Auxiliary decision variable used to determine the value of $rec_{n,i,t}$ and $dis_{n,i,t}$ (takes the value 0 or 1)

2.4.4 Device of Internet of Thing (DIOT)

In order to determine intelligently the recovery condition, the concept of DIOT (Turan et al., 2016) is deployed, adding recycling as a possible recovery processing. More concretely, the DIOT is a device embedded in objects, such as sensors or RFID tags as shown in Figure 2.4. This device can trace the product's lifecycle, especially the parameters/conditions it experienced throughout its lifecycle, which could result in product/component degradation (temperature, humidity, mechanical or thermal shock, usage outside the manufacturer's specifications). All this product information can be communicated to the manufacturer via internet connections. Each recovered component is associated with a value: $diot_{n,i,j,t}$.

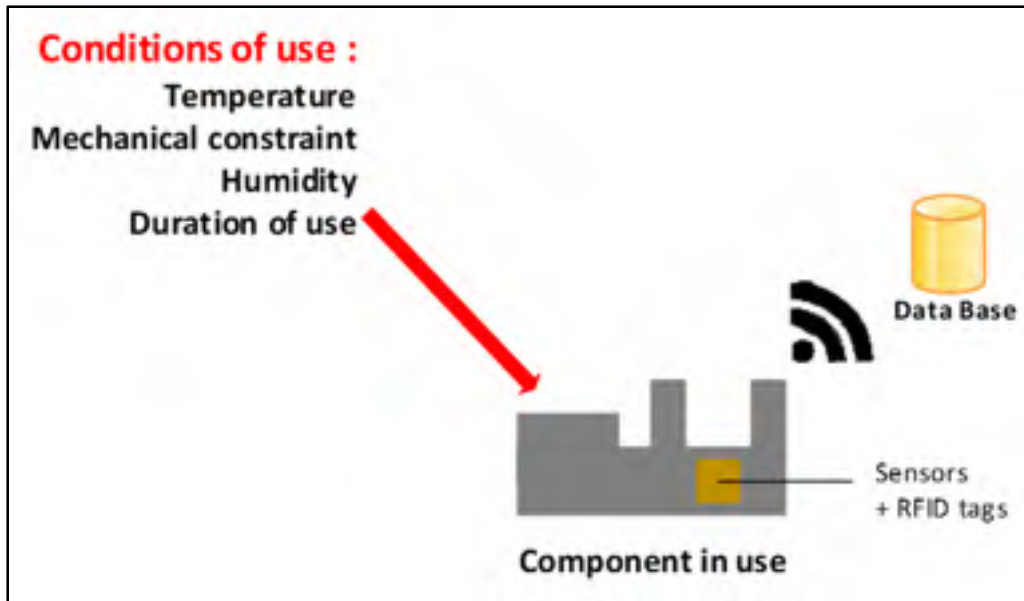


Figure 2.4 Device of the Internet of Things (DIOT)

The $diot_{n,i,j,t}$ defines the condition of a recovered component by assigning a grade between 0 and 10 upon its current state (Fig. 5). Figure 2.5 presents an overview of the product evaluation including the threshold values $nj1$, $nj2$ and $nj3$ determining the deciding treatment (elimination, recycling, remanufacturing, reuse) for each component.

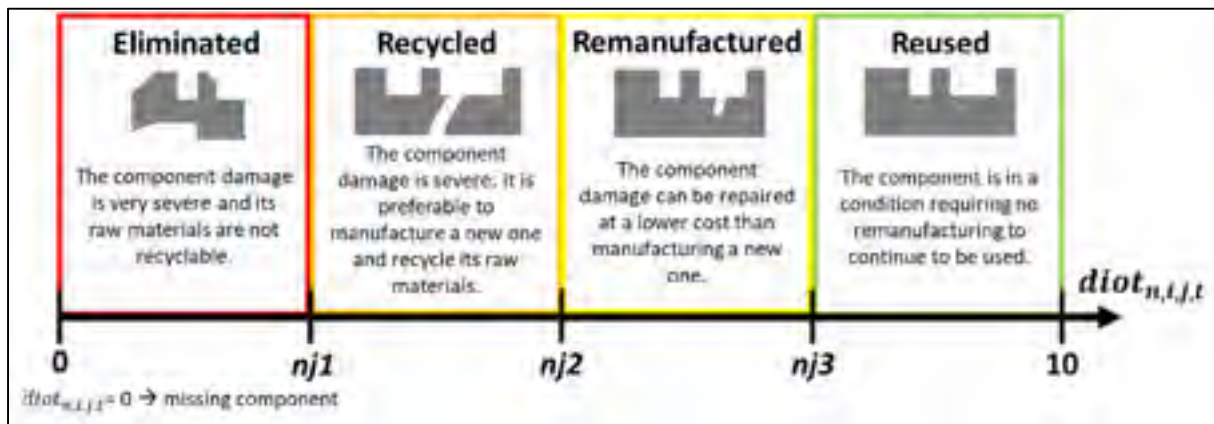


Figure 2.5 Principle of choice for component recovery processing according to its $diot_{n,i,j,t}$ and its assessment on the threshold values $nj1$, $nj2$ and $nj3$

So far, the $diot_{n,i,j,t}$ was a value that was not concretely defined, in this study a linear model is developed to associated the $diot$ with the remanufacturing cost. The remanufacturing cost $f_{n,i,j,t}$ is defined in Equation (1) and represented in Figure 2.6.

$$f_{n,i,j,t} = \begin{cases} rf \cdot cn_{n,j} \cdot \frac{m_j}{nj3 - nj2} \cdot (nj3 - diot_{n,i,j,t}) & \text{if } nj2 \leq diot_{n,i,j,t} < nj3 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.1)$$

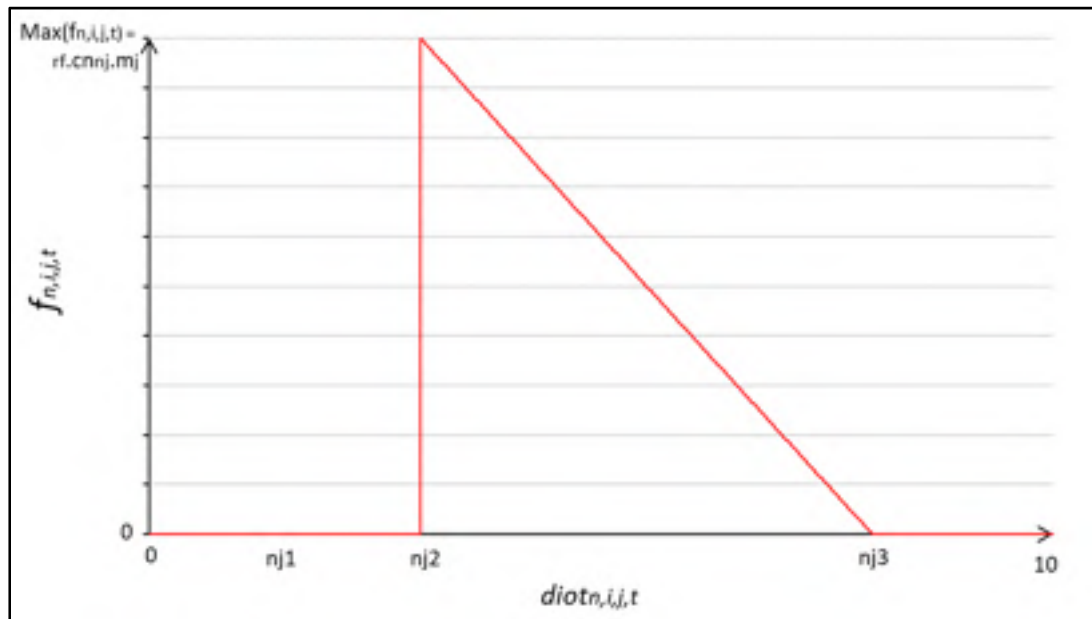


Figure 2.6 Remanufacturing cost $f_{n,i,j,t}$ according to $diot_{n,i,j,t}$

Each recovered product is associated with a $diot_{n,i,t}$ which, in the same way as the $diot_{n,i,j,t}$ for the components, defines the processing (disposal, recycling, dismantling) that the product will undergo according to product threshold values ($ni1$, $ni2$), as shown in Figure 2.7. The $diot_{n,i,t}$ is calculated as the weighted average of the $diot_{n,i,j,t}$ in proportion to the weight of each component $cw_{n,j}$ as in Equation (2).

$$diot_{n,i,t} = \sum_j cw_{n,j} \cdot diot_{n,i,j,t}. \quad (2.2)$$

The importance component weight $cw_{n,j}$ is calculated as the average of the manufacturing cost of the product and the raw materials it contains over the total cost of the product:

$$cw_{n,j} = \frac{cn_{n,j} \cdot (m_j + \sum_k n_{j,k})}{\sum_j cn_{n,j} \cdot (m_j + \sum_k n_{j,k})} \quad (2.3)$$

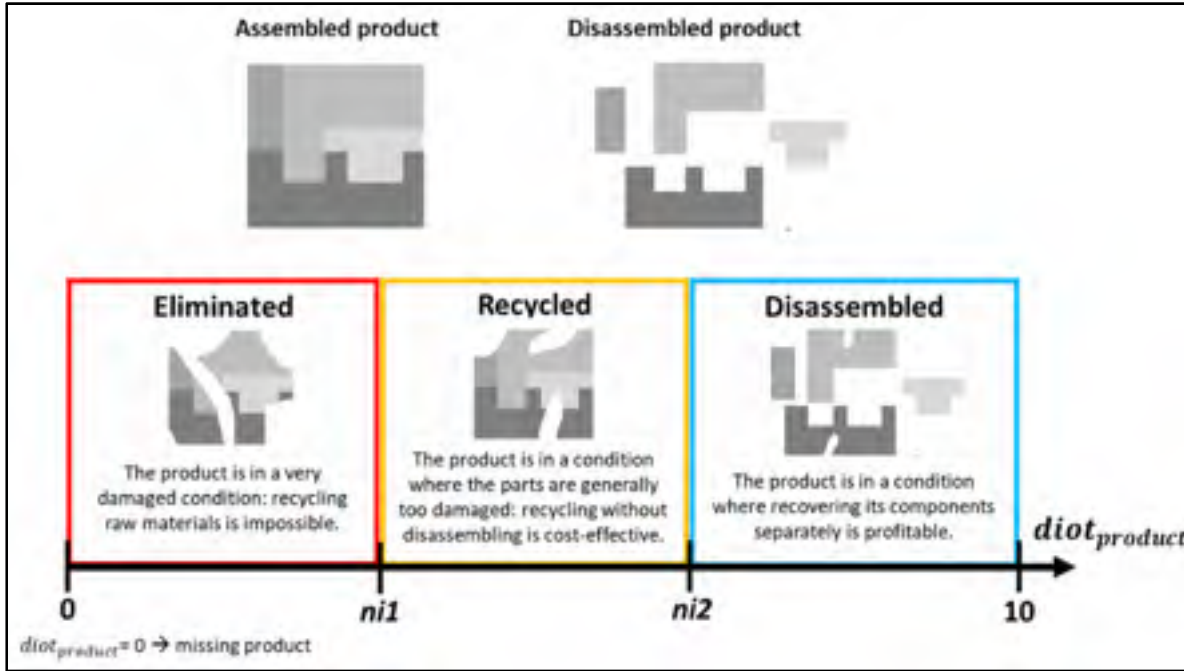


Figure 2.7 Principle of choice of product recovery processing according to its $diot_{n,i,t}$ and its evaluation on the threshold values $ni1$ and $ni2$

The $diot_{n,i,t}$ is used to determine the purchase value of the returned product. This value depends on two factors. The first is the manufacturing cost of the components separately (rpa_n) which is weighted by the coefficient ra . The second is the value of the raw materials present in the product after recycling (rma_n). Their expressions are given in the Equation (4) and Equation (5):

$$rpa_n = ra \cdot \sum_j cn_{n,j} \cdot m_j \quad (2.4)$$

$$rma_n = \sum_j cn_{n,j} \cdot \sum_k h6_k \cdot rp_k \cdot n_{j,k} \quad (2.5)$$

This choice was made because the cost of recovering individual parts is the deciding factor that will determine if the recovery process chosen for the product is more cost effective than any other. The recovery price for EOL products $r_{n,i,t}$ is defined as in Equation (6) and represented in Figure 2.8. In order to be able to plot equation (6), Figure 2.8 outlines an example with randomly chosen values for ni_1 and ni_2 (here: $ni_1 = 1$ and $ni_2 = 3$) for illustration purposes.

$$r_{n,i,t} = \begin{cases} \frac{rpa_n}{10-ni_2} \cdot diot_{n,i,t} + rma_n - \frac{rpa_n \cdot ni_2}{10-ni_2} & \text{if } ni_2 \leq diot_{n,i,t} \\ rma_n & \text{if } ni_1 \leq diot_{n,i,t} < ni_2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.6)$$

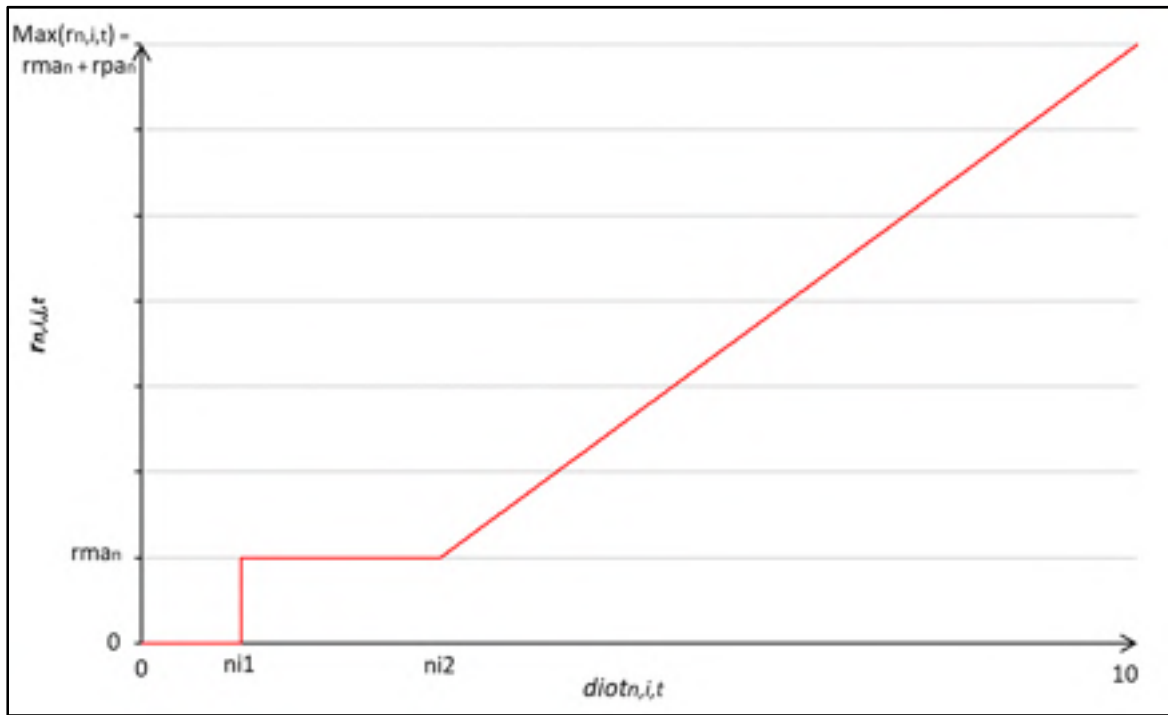


Figure 2.8 Recovery rate for EOL products $r_{n,i,t}$ according to $diot_{n,i,t}$

2.5 Mathematical model

Based on the above assumptions, a CLSC mathematical model is developed to determine how to process all returned products in order to maximize profit.

2.5.1 Variables and parameters

Recovered products can be eliminated, recycled or disassembled. Binary variables are defined to indicate the recovery process when the model is solved. The variable $dis_{n,i,t}$ indicates that a product is disassembled, possible if the value of $dior_{n,i,t}$ is sufficiently large ($dior_{n,i,t} > ni2$):

$$\begin{aligned} dis_{n,i,t} & \\ = & \begin{cases} 0 & \text{if } dior_{n,i,t} < ni2 \text{ (the product is in insufficient condition to be disassembled)} \\ dvp2_{n,i,t} & \text{otherwise (1 if the product is disassembled, 0 otherwise)} \end{cases} \end{aligned} \quad (2.7)$$

The variable $rec_{n,i,t}$ indicates that a product is recycled. This is possible if the value of $dior_{n,i,t}$ is sufficiently large ($dior_{n,i,t} > ni1$):

$$\begin{aligned} rec_{n,i,t} & \\ = & \begin{cases} 0 & \text{if } dior_{n,i,t} < ni1 \text{ (the product is in insufficient condition to be recycled)} \\ dvp1_{n,i,t} & \text{otherwise (1 if the product is recycled, 0 otherwise)} \end{cases} \end{aligned} \quad (2.8)$$

The variable $was_{n,i,t}$ specifies if the product has been eliminated. A product that is not missing can only have one single recovery processing among disassembly, recycling and disposal:

$$dis_{n,i,t} + rec_{n,i,t} + was_{n,i,t} = 1, \forall (t, n, i) \quad (2.9)$$

These binary variables are used to count the number of recovered products n disposed of, recycled and disassembled during each period. The amount of n products disposed of in period t is:

$$U_{n,t} = \sum_i was_{n,i,t}. \quad (2.10)$$

The amount of products n recycled in period t is calculated as follows:

$$P_{n,t} = \sum_i rec_{n,i,t}. \quad (2.11)$$

The amount of products n disassembled is:

$$Q_{n,t} = \sum_i dis_{n,i,t}. \quad (2.12)$$

The disassembled product components receive recovery processing, which is defined by the $dior_{n,i,j,t}$ value. The components can either be missed, eliminated, recycled, remanufactured or reused directly. As with the products, in Equations 13-16, binary variables are created that indicate the chosen processing when the model is solved:

$$mis_{n,i,j,t} = \begin{cases} 1 & \text{if } dior_{n,i,j,t} = 0 \text{ (the component is missing)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.13)$$

$$reu_{n,i,j,t} \quad (2.14)$$

$$= \begin{cases} 0 & \text{if } dior_{n,i,j,t} < nj3 \text{ (the component is in insufficient condition to be reused)} \\ dvc3_{n,i,j,t} & \text{otherwise (1 if component is reused, 0 otherwise)} \end{cases}$$

$$rem_{n,i,j,t} \quad (2.15)$$

$$= \begin{cases} 0 & \text{if } dior_{n,i,j,t} < nj2 \text{ (the component is in insufficient condition to be remanufactured)} \\ dvc2_{n,i,j,t} & \text{otherwise (1 if component is remanufactured, 0 otherwise)} \end{cases}$$

$$rec_{n,i,j,t} \quad (2.16)$$

$$= \begin{cases} 0 & \text{if } dior_{n,i,j,t} < nj1 \text{ (the component is in insufficient condition to be recycled)} \\ dvc1_{n,i,j,t} & \text{otherwise (1 if component is recycled, 0 otherwise)} \end{cases}$$

A non-missing component can only undergo a single recovery treatment among reuse, remanufacturing, recycling and disposal, therefore:

$$reu_{n,i,j,t} + rem_{n,i,j,t} + rec_{n,i,j,t} + was_{n,i,j,t} + mis_{n,i,j,t} = 1, \forall(t, n, i, j). \quad (2.17)$$

The number of components j following each treatment can then be calculated for each period t . The amount of components j eliminated in period t is:

$$M_{j,t} = \sum_n (cn_{n,j} \cdot \sum_i was_{n,i,j,t} \cdot dis_{n,i,t}). \quad (2.18)$$

The amount of components j recycled in period t is calculated as follows:

$$C_{j,t} = \sum_n (cn_{n,j} \cdot \sum_i rec_{n,i,j,t} \cdot dis_{n,i,t}). \quad (2.19)$$

The amount of components j remanufactured in period t is:

$$Rfc_{j,t} = \sum_n (cn_{n,j} \cdot \sum_i rem_{n,i,j,t} \cdot dis_{n,i,t}). \quad (2.20)$$

The amount of components j reused in period t is:

$$R1_{j,t} = \sum_n (cn_{n,j} \cdot \sum_i reu_{n,i,j,t} \cdot dis_{n,i,t}). \quad (2.21)$$

2.5.2 Objective function

The objective of this CLSC model is to maximize the profit of the company defined in Figure 2.3. Total profit is calculated as the difference between the total revenue and the total cost.

2.5.2.1 Total revenue

The sale of products, components and raw materials are the company's main sources of revenue. This revenue (TRS) is calculated as follows:

$$TRS = \sum_t \sum_n h1_n \cdot V_{n,t} + \sum_t \sum_n h2_n \cdot K_{n,t} + \sum_t \sum_j h4_j \cdot S_{j,t} + \sum_t \sum_j h3_j \cdot Y_{j,t} + \sum_t \sum_k h4_k \cdot RM1_{k,t}. \quad (2.22)$$

The sale of products, components and machining scraps containing raw materials recovered from recycling are also a source of revenue for the company. Revenue from recycling (TRR) is equal to:

$$TRR = \sum_t \sum_n P_{n,t} \cdot \sum_j cn_{n,j} \cdot \sum_k h6_k \cdot rp_k \cdot n_{j,k} + \sum_t \sum_j C_{j,t} \cdot \sum_k h5_k \cdot rc_k \cdot n_{j,k} + \sum_t \sum_k h7_k \cdot MC1_{k,t}. \quad (2.23)$$

2.5.2.2 Total cost

The company has two types of purchase to produce products and components. The first is the purchase of raw materials and the second purchases are returned products. The purchase price of each product depends on the $dio_{n,i,t}$ and is given by the $r_{n,i,t}$ value. The total purchase cost (TPC) is calculated as follows:

$$TPC = \sum_t \sum_k pm_k \cdot M1_{k,t} + \sum_t \sum_n \sum_i r_{n,i,t}. \quad (2.24)$$

The company also has manufacturing costs. The company manufactures new components, assembles products, disassembles EOL products and remanufactures recovered components. The total manufacture cost (TMC) is calculated as follows:

$$TMC = \sum_t \sum_j m_j \cdot X_{j,t} + \sum_t \sum_n a_n \cdot (Z_{n,t} + F_{n,t}) + \sum_t \sum_n d_n \cdot Q_{n,t} + \sum_t \sum_n \sum_i \sum_j cn_{n,j} \cdot rem_{n,i,j,t} \cdot f_{n,i,j,t}. \quad (2.25)$$

The company also eliminates products and components. The total disposal cost (*TDC*) is calculated as follows:

$$TDC = \sum_t \sum_n el_n \cdot U_{n,t} + \sum_t \sum_j e_j \cdot M_{j,t}. \quad (2.26)$$

Transportation of products, components and raw materials has a cost. The total transportation cost (*TTC*) is calculated as follows:

$$\begin{aligned} TTC = & \sum_t \sum_n (g1_n \cdot Z_{n,t} + g2_n \cdot V_{n,t} + g3_n \cdot Q_{n,t} + g4_n \cdot U_{n,t} + g5_n \cdot F_{n,t} + \\ & g6_n \cdot K_{n,t}) + \sum_t \sum_j (g7_j \cdot X_{j,t} + g8_j \cdot Y_{j,t} + g9_j \cdot H_{j,t} + g10_j \cdot N_{j,t} + \\ & g11_j \cdot D_{j,t} + g12_j \cdot W_{j,t} + g13_j \cdot R1_{j,t} + g14_j \cdot Rfc_{j,t} + g15_j \cdot C_{j,t} + \\ & g16_j \cdot M_{j,t} + g17_j \cdot S_{j,t}) + \sum_t \sum_k (g18_k \cdot RM1_{k,t} + g19_k \cdot M1S_{k,t} + \\ & g20_k \cdot REM1_{k,t} + g21_k \cdot MC1_{k,t}). \end{aligned} \quad (2.27)$$

The products, the components and the raw materials are stored. The total storage cost (*TSC*) is calculated as follows:

$$\begin{aligned} TSC = \sum_t \sum_n scp_n \cdot (PS_{n,t} + NPS_{n,t}) + \sum_t \sum_j scc_j \cdot (UCS_{j,t} + NCS_{j,t}) + \\ \sum_t \sum_j scm_k \cdot RMS_{k,t}. \end{aligned} \quad (2.28)$$

The objective of the model is to maximize total profit (*TP*):

$$Max TP = (TRS + TRR) - (TPC + TMC + TDC + TTC + TSC). \quad (2.29)$$

2.5.3 Circular Economy Total Profit

The aim of this study is to improve estimation of the profit achieved by recycling, remanufacturing, maintenance spare parts and the sales of products with components used in the past. This profit is called the “Circular Economy Total Profit” denoted as TP_{CE} . It is

possible to calculate the profit made by distributing products with new components only, denoted as $TP_{\text{DirectLoop}}$:

$$TP_{\text{DirectLoop}} = \sum_t \sum_n h2_n \cdot K_{n,t} - \sum_t \sum_j m_j \cdot W_{j,t} - \sum_t \sum_k pm_k \cdot \sum_j X_{j,t} \cdot (n_{j,k} + cm_{j,k}). \quad (2.30)$$

So, we can deduce that, using the expression of TP in Equation (29):

$$TP_{\text{CE}} = TP - TP_{\text{DirectLoop}}. \quad (2.31)$$

2.5.4 Constraints

The constraints of the model including the different entities are described below.

2.5.4.1 Sales and Collection center demand

For each period t , the amounts of products n (with new or used components only), components j (new or used) and raw material k sent to the S&C center cannot exceed the S&C demand:

$$V_{n,t} \leq dm_{n,t}, \forall (t, n). \quad (2.32)$$

$$K_{n,t} \leq dmn_{n,t}, \forall (t, n). \quad (2.33)$$

$$Y_{j,t} \leq dms_{j,t}, \forall (t, j). \quad (2.34)$$

$$S_{j,t} \leq dmc_{j,t}, \forall (t, j). \quad (2.35)$$

$$RM1_{k,t} \leq dm_{k,t}, \forall (t, k). \quad (2.36)$$

2.5.4.2 Stock management

For each period t , the amounts of products n (with new or used components only), components j (new or used) and raw material k leaving stocks is equal to the difference between the amounts arriving in stocks and the amount in stocks in the previous period, and the amount in stocks may not exceed the maximum stock capacity and must not be negative:

$$stock_t = stock_{t-1} + enter\ flow_t - outgoing\ flow_t, \forall t \quad (2.37)$$

$$0 \leq stock_t \leq maximum\ stock, \forall t. \quad (2.38)$$

2.5.4.3 Manufacturing

For each period t , the amount of raw material k required to manufacture the components is calculated as follows:

$$M1S_{k,t} - (MC1_{k,t} + \sum_j X_{j,t} \cdot n_{j,k}) = 0, \forall (t, k). \quad (2.39)$$

For each period t , the amount of raw material k wasted in production is given by:

$$MC1_{k,t} - \sum_j X_{j,t} \cdot cm_{j,k} = 0, \forall (t, k). \quad (2.40)$$

2.5.4.4 Recycling

The amount of raw material k recycled from products in period t is calculated as follows:

$$RPM1_{k,t} - rp_k \cdot \sum_n P_{n,t} \cdot \sum_j cn_{n,j} \cdot n_{j,k} = 0, \forall (t, k). \quad (2.41)$$

The amount of raw material k recycled from components in period t is calculated as follows:

$$RCM1_{k,t} - \sum_j C_{j,t} \cdot rc_{j,k} \cdot n_{j,k} = 0, \forall (t, k). \quad (2.42)$$

For each period t , the amount of raw material k recycled from manufacturing scrap is given by:

$$MC2_{k,t} - MC1_{k,t} \cdot rcm_k = 0, \forall(t, k). \quad (2.43)$$

2.5.4.5 Remanufacturing

For each period t , the amount of component j arriving at remanufacturing is equal to the amount leaving it.:

$$Rfc_{j,t} - D_{j,t} = 0, \forall(j, t). \quad (2.44)$$

For each period t , the amount of raw material k required to remanufacture the components is given by:

$$REM1_{k,t} - \sum_j Rfc_{j,t} \cdot rn_{j,k} = 0, \forall(t, k). \quad (2.45)$$

2.5.4.6 Products Assembly

The quantity of component j for assembling the products with new components only in period t is calculated as follows:

$$W_{j,t} - \sum_n cn_{n,j} \cdot F_{n,t} = 0, \forall(t, j). \quad (2.46)$$

If the number of used components recovered is not sufficient to manufacture the products with used components, new components can be added. Thus, the amount of component j to assemble the products with used components at period t is given by:

$$H_{j,t} + N_{j,t} - \sum_n Z_{n,t} \cdot rc_{n,j} = 0, \forall(t, j). \quad (2.47)$$

2.5.4.7 Raw materials management

The amount of new raw material k entering the supply chain in period t to satisfy the different demands of the S&C center is:

$$M1_{k,t} - (NM1_{k,t} + RPM1_{k,t} + RCM1_{k,t} + MC2_{k,t}) = 0, \forall(t, k). \quad (2.48)$$

2.6 A case study: a numerical example

In this section, we will apply the developed CLSC model to an actual marketed product. We will study this case for one period ($T=1$) and for one single product ($N=1$).

2.6.1 Fairphone: a modular smartphone

Fairphone is a Dutch company that designs and manufactures smartphones that are more environmentally friendly and commercially fair. Fairphone aims to develop the circularity of its products and is already offering to buy back EOL smartphones to recycle their present raw materials. However, Fairphone buys EOL smartphones at fixed prices, regardless of their condition, and has little regard for the reuse and remanufacturing of these products. The developed case study illustrates the potential economic advantages for a company manufacturing an electronic device in large quantities and wanting to implement the proposed CLSC. In addition, this case study deals with smartphones, an electronic device whose integration into CE is currently promoted (Wang, 2020).

This study considers their smartphone model “Fairphone 2”, which can be decomposed into 10 main components ($J=10$). Each component is composed of sub-components that will not be considered individually: their manufacture and assembly will be included in the manufacturing cost of the main components. These components are outlined in Table 2.3 and Figure 2.9 gives an overview of the components and its location at the “Fairphone 2” smartphone (Fairphone, 2015).

Table 2.5 Fairphone 2 components list

j=1	Back cover	j=6	Metal shielding plate
j=2	Battery	j=7	Top module
j=3	Display module	j=8	Core module
j=4	Bottom module	j=9	Heat Dissipator
j=5	Camera module	j=10	Antenna cable

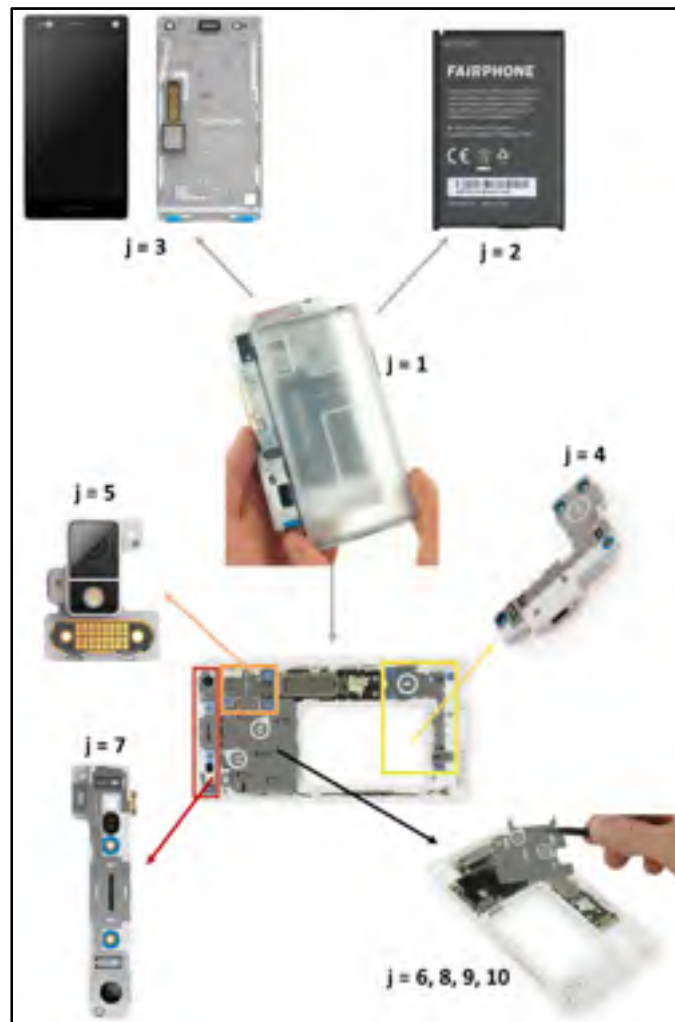


Figure 2.9 Fairphone 2 disassembly components (Fairphone, 2015)

2.6.2 Model adjustment

Fairphone provides access to the entire supply chain of its Fairphone 2 model (Fairphone, 2020), from the procurement of raw materials from its subcontractors to the distribution of the final product. Some adaptations of our model are necessary to match the model of this modular smartphone company:

- the S&C center has no demand in raw materials. We consider the loss of raw materials during the component manufacturing as zero.
- the component remanufacturing process does not require additional raw materials.
- products and components cannot be disposed of without the raw materials being recycled. This is equivalent to fixing threshold values $ni_1 = 0$ and $nj_1 = 0$. In this case, $M_{j,t} = 0$ and $U_{n,t} = 0$ for all (n,j,t)
- the recovered products contain all their components.
- the production capacity is always sufficient.

Considering these simplifications, Figure 2.10 outlines the developed CLSC model for this case study on the Fairphone 2 model.

Figure 2.10 CLSC model adapted to the Fairphone case

The data provided by Fairphone is freely accessible and enables to estimate the amounts of raw materials in each component (Proske, Clemm, & Richter, 2016). While the composition is not fully known, main unknowns are in the quantities of plastics, which have a negligible cost compared to the costs of rare metals. The impact on total profit is therefore considered negligible. We consider 27 raw materials (i.e., $K=27$) in the Fairphone 2. Data considering raw materials are given in Table 2.6, further details can be found in Annex II, Annex III and Annex IV.

Table 2.8 Raw materials considered in the Fairphone 2

k=1	Nickel	k=15	Lithium cobalt oxyde
k=2	Gold	k=16	Graphite
k=3	Silver	k=17	Lithium hexafluorophosphate
k=4	Copper	k=18	Aluminium
k=5	Zinc	k=19	Glass substrate
k=6	Silicon	k=20	Tungsten
k=7	Phosphorus	k=21	Neodymium
k=8	Liquid cristal polymere	k=22	Palladium
k=9	Manganese	k=23	Praseodymium
k=10	Polycarbonate	k=24	Tantalum
k=11	Glass fibers	k=25	Tin
k=12	Polyamide 6.6	k=26	Steel
k=13	Brass	k=27	Indium
k=14	Thermoplastic polyurethane		

2.6.4 DIOT modeling

In this case study, the $d_{i,j,t}$ are randomly assigned following laws of probability to each component. We note $d_{i,j,t}^{PROB}$ the value randomly assigned according to this law. In a first step, it is assumed that these laws have normal distributions. In a second step, we will look for other laws. Components that are more susceptible to degradation, because they are more exposed to the external environment or because of a more fragile design and/or behavior and

consequently recovered in worse conditions, have on an average $diot_{n,i,j,t \text{ PROB}}$ lower values and a larger standard deviation.

$$diot_{n,i,j,t \text{ PROB}} \hookrightarrow \mathcal{N}(\mu, \sigma) \quad (2.49)$$

The battery cannot be remanufactured or reused, therefore it is always recycled. For this reason, we fix $diot_{n,i,j,t} = 2.5$ for all recovered batteries. Details of the means (μ) and standard deviations (σ) of the $diot_{n,i,j,t \text{ PROB}}$ values of each component are presented in Table 7.

Table 2.9 Component $diot_{n,i,j,t \text{ PROB}}$ values

Component		$diot_{n,i,j,t \text{ PROB}}$	
		μ	σ
Slim Case	j=1	5	2
Display module	j=3	3	2
Bottom module	j=4	5	2
Camera module	j=5	4	2
Metal shelding plate	j=6	8	1
Top module	j=7	5	2
Motherboard	j=8	5	2
Heat dissipator	j=9	8	1
Antenna	j=10	8	1

The following convention for values of $diot_{n,i,j,t \text{ PROB}}$ which are not in the interval $[0,10]$ in the random assignment is presented by equation (49):

$$diot_{n,i,j,t} = \begin{cases} 0.1 & \text{if } diot_{n,i,j,t \text{ PROB}} < 0 \\ 10 & \text{if } diot_{n,i,j,t \text{ PROB}} > 10 \\ diot_{n,i,j,t \text{ PROB}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.50)$$

2.6.5 Studied variables

In a first step, the experiments conducted in this section aim to estimate the impact on the total profit generated by strategical decisions, such as the selling price of reused and remanufactured products and components or the effort to recover end-of-life smartphones. In a second step, experiments will identify the impact of $d_{i,j,t}$ on total profit by modeling the distribution of these values by different probability laws. Finally, the impact of product customization will be explored by increasing the number of different products in the Fairphone range of products.

2.6.6 Parameter variation range

Data on the return chain are not currently available. In order to study the sensitivity with respect to the parameters of the return chain, a reference case is set. To view the sensitivity of TP in relation to the resale price of used products ($h1_n$) and components ($h4_j$), the variable rv is defined as such:

$$h1_n = rv \cdot h2_n, \forall n. \quad (2.51)$$

$$h4_j = rv \cdot h3_j, \forall j. \quad (2.52)$$

For the sensitivity in relation to the purchase cost of EOL Fairphones and the cost of component remanufacturing, the ra and rf values will be variable. Finally, the impact on profit of the recovery effort, i.e. the number of EOL Fairphones recovered in relation on the product and component used in the past ($R_{1,1}/dm_{1,1}$) will be studied. The values for our reference case are based on average values from the literature. For the sales price of remanufactured products, a ratio $rv = 0.6$ is an acceptable value in the literature (Y. Zhang et al., 2018). For the remanufacturing cost, the cost can vary between the cost of manufacturing a new component and zero cost (Reimann, Xiong, & Zhou, 2019), so the average value $rf = 0.5$ is chosen. For the repurchase price of EOL products, we consider that a product is repurchased in the best case (i.e. when $d_{i,j,t} = 10$), at the price of the raw materials that compose it and the

manufacturing price of the components. This is the case $ra = 1$. To study cases where the number of products recovered is above and below the remanufactured product demand, $R_{1,1}/dm_{1,1} = 1$ is chosen. These reference case values are summarized in Table 2.8:

Table 2.10 Parameter values for the reference case

	Reference case
rv	0.6
ra	1
rf	0.5
$R_{1,1}/dm_{1,1}$	1

For the influence of $d_{i,j,t}$, the averages of the normal distributions dictating $d_{i,j,t}^{PROB}$ of the display module ($j = 3$), the second most expensive component of the Fairphone; and of the camera module ($j = 5$), which is economically less important.

As there is no real data available for the $d_{i,j,t}^{PROB}$, we propose to look at different probability distributions in order to study the sensitivity of the model. The evolution of the profit will be observed in the case where the $d_{i,j,t}^{PROB}$ of the display module ($j = 3$) follows a geometric or X^2 distribution (Giroux, 2007) for several mean values.

Finally, to study the integration of mass-customization required in an Industry 4.0 context, we consider that Fairphone offers the possibility of customizing its phones by offering two types of display modules and two types of camera modules. For example, the user can choose between a smaller ($j = 3$) or larger ($j = 11$) screen and a camera without ($j = 5$) or with a wide angle ($j = 12$). In this way, we study the cases where $J=12$ and $N=2, 3$ or 4 . The different configurations are presented in Table 2.9:

Table 2.11 Parameters of the different smartphone models

	Display module		Camera module			
	j=3	j=11	j=5	j=12		
m _j	60.9	70	31.5	50	h1 _n	
h3 _j	72.5	83.9	37.5	59.5		
c _{nn,j}	n=1	1	0	1	0	407
	n=2	0	1	0	1	500
	n=3	1	0	0	1	450
	n=4	0	1	1	0	460

The demand for remanufactured mobile phones corresponds to 40% of the total demand. This is a case where the demand for remanufactured products is slightly higher than the current demand of industrialized countries, which is 30% (Sinha, Laurenti, Singh, Malmström, & Frostell, 2016). This choice is justified because consumers are increasingly accepting to buy remanufactured products and this ratio is continuously increasing (van Weelden, Mugge, & Bakker, 2016). Product and component demands and importance component weights are given in Tables 10-11:

Table 2.12 Product demands

		dm _{nn,t}	dm _{n,t}
N = 1	n = 1	150	100
	n = 2	75	50
N = 2	n = 1	75	50
	n = 2	75	50
N = 3	n = 1	50	34
	n = 2	50	33
	n = 3	50	33
N = 4	n = 1	39	25
	n = 2	37	25
	n = 3	37	25
	n = 4	37	25

Table 2.13 Component demands and importance component weights

		j = 1	j = 2	j = 3	j = 4	j = 5	j = 6	j = 7	j = 8	j = 9	j = 10	j = 11	j = 12
cwn,j	n = 1	0.08	0.00	0.28	0.08	0.14	0.01	0.10	0.29	0.01	0.01	0.00	0.00
	n = 2	0.07	0.00	0.00	0.07	0.00	0.01	0.09	0.26	0.01	0.01	0.29	0.20
	n = 3	0.07	0.00	0.26	0.07	0.00	0.01	0.09	0.27	0.01	0.01	0.00	0.21
	n = 4	0.08	0.00	0.00	0.31	0.08	0.14	0.01	0.09	0.28	0.01	0.01	0.00
dmsj,1		10	10	6	10	6	10	10	10	10	10	4	4
dmcj,1		5	5	3	5	3	5	5	5	5	5	2	2

2.6.7 Reference case of the sensitivity analysis

To obtain the average response of the model with the reference parameters, we generate sets of $diot_{1,i,j,1}$ and solve the model with LINGO 16.0. The resolution of the model takes about 20 minutes for the most complex cases. Then, we calculate the averages of the total profit and of each decision variables. The results are given in Tables 12-15.

Table 2.14 Profits in reference case

<i>TP_{ReferenceCase}</i>	33 111.30€
<i>TP_{DirectLoop}</i>	25 431.78 €
<i>TP_{CE,ReferenceCase}</i>	7679.52 €

$TP_{DirectLoop} = 25\,431\text{€}$ represents the profit made by Fairphone with its current supply-chain model without recovery of EOL smartphones. In the sensitivity analysis, $TP_{DirectLoop}$ remains constant because none of the parameters associated with it vary. The total profit brought back by the implementation of the Circular Economy is $TP_{CE,ReferenceCase} = 7679.52\text{€}$ in the reference case. Thus, the total profit increased by 30% thanks to the recovery of EOL products and associated sales.

Table 2.15 Values of product-related decision variables for the reference case

R1,1	P1,1	U1,1	Q1,1	F1,1	K1,1	Z1,1	V1,1	PS1,1	NPS1,1
100	5.63	0	94.37	150	150	100	100	0	0

In this reference case, on average, 94.37 of the 100 smartphones recovered are disassembled. Thus, EOL smartphones are generally in a good condition and recovering the components is beneficial.

Table 2.16 Values of component-related decision variables for the reference case

	Xj,1	Yj,1	Wj,1	Hj,1	Nj,1	Dj,1	R1j,1	Rfcj,1	Sj,1	Cj,1	UC_stockj,1	NC_stockj,1
j=1	179.14	10	150	19.14	80.86	74.29	6.57	74.29	0	13.51	0	0
j=2	260	10	150	100	0	0	0	0	0	94.37	0	0
j=3	210.31	10	150	50.31	49.69	49.17	0.52	49.17	0	44.68	0	0
j=4	180.16	10	150	20.16	79.84	73.34	6.5	73.34	0	14.53	0	0
j=5	192.93	10	150	32.93	67.07	64.77	2.3	64.77	0	27.3	0	0
j=6	165.63	10	150	5.63	94.37	46.67	47.7	46.67	0	0	0	0
j=7	179.66	10	150	19.66	80.34	74.06	6.28	74.06	0	14.03	0	0
j=8	177.86	10	150	17.86	82.14	75.33	6.81	75.33	0	12.23	0	0
j=9	165.63	10	150	5.63	94.37	48.18	46.19	48.18	0	0	0	0
j=10	165.63	10	150	5.63	94.37	46.98	47.39	46.98	0	0	0	0

For component flows, we note that whenever possible, components are reused ($R1_{j,1}$) or remanufactured ($Rfc_{j,1}$). Indeed, this is the most profitable way of supplying the market with used products at a lower cost. It should also be noted that not enough EOL products are recovered to satisfy the demand for used components sold separately, as it is more profitable to use them for remanufactured products: $S_{j,1} = 0$ for all components. Stocks remain at zero because only one period is considered and the quantity of EOL product recovered is not large enough compared to demand. We can see that the display module ($j=3$) is the most fragile

component, given the average of its $diot_{n,i,j,t}^{PROB}$: it is for $j=3$ that the amount of new components used in the assembly of refurbished products $H_{j,1}$, is the highest.

Table 2.17 Values of raw material-related decision variables for the reference case

	NM1k,1	M1k,1	M1Sk,1	RCM1k,1	RPM1k,1	RM_stockk,1
k=1	11.9923	13.82	13.816	1.450546	0.37336	0
k=2	4.70407	5.434	5.4344	0.574413	0.15596	0
k=3	48.25	54.34	54.344	4.534843	1.55963	0
k=4	230.461	272.8	272.75	34.66222	7.62947	0
k=5	4.51077	5.339	5.3385	0.678436	0.14933	0
k=6	4.73534	5.604	5.6043	0.712212	0.15676	0
k=7	2.84185	3.363	3.3634	0.427425	0.09408	0
k=8	185.148	219.1	219.12	27.84699	6.12938	0
k=9	53.0949	61.65	61.647	7.009669	1.54289	0
k=10	4327.01	4818	4818.5	347.7041	143.779	0
k=11	1943	2161	2161.1	153.5794	64.5671	0
k=12	1515	1686	1686	120.6173	50.3428	0
k=13	13.5226	15.09	15.091	1.119594	0.44927	0
k=14	643.828	716.6	716.56	51.338	21.394	0
k=15	2319.9	3656	3655.6	1260.5	75.1999	0
k=16	1550.4	2371	2371.2	774.589	46.211	0
k=17	877.8	1383	1383.2	476.946	28.454	0
k=18	356.843	371.5	371.47	14.1555	0.47095	0
k=19	2437.73	3155	3154.7	636.69	80.2275	0
k=20	200.644	201.7	201.75	0.787742	0.31611	0
k=21	8.93385	8.983	8.983	0.035075	0.01408	0
k=22	1.78625	1.976	1.9763	0.131181	0.05883	0
k=23	1.78677	1.797	1.7966	0.007015	0.00282	0
k=24	3.63006	3.657	3.6575	0.021917	0.00547	0
k=25	157.449	176.8	176.78	15.89012	3.43767	0
k=26	692.54	712	711.95	2.579369	16.8351	0
k=27	0.94259	1.22	1.2198	0.246187	0.03102	0

Finally, for raw materials, it is satisfying to note that the amount of primary raw material ($NM1_{k,1}$) entering the chain is less than the amount necessary for the production of components and products ($M1_{k,1}$) thanks to the various recyclings.

2.6.8 Sensitivity analysis

For each of the variations, the simulation is repeated, generating new $d_{i,j,t}$ to get closer to the average behaviour of the system.

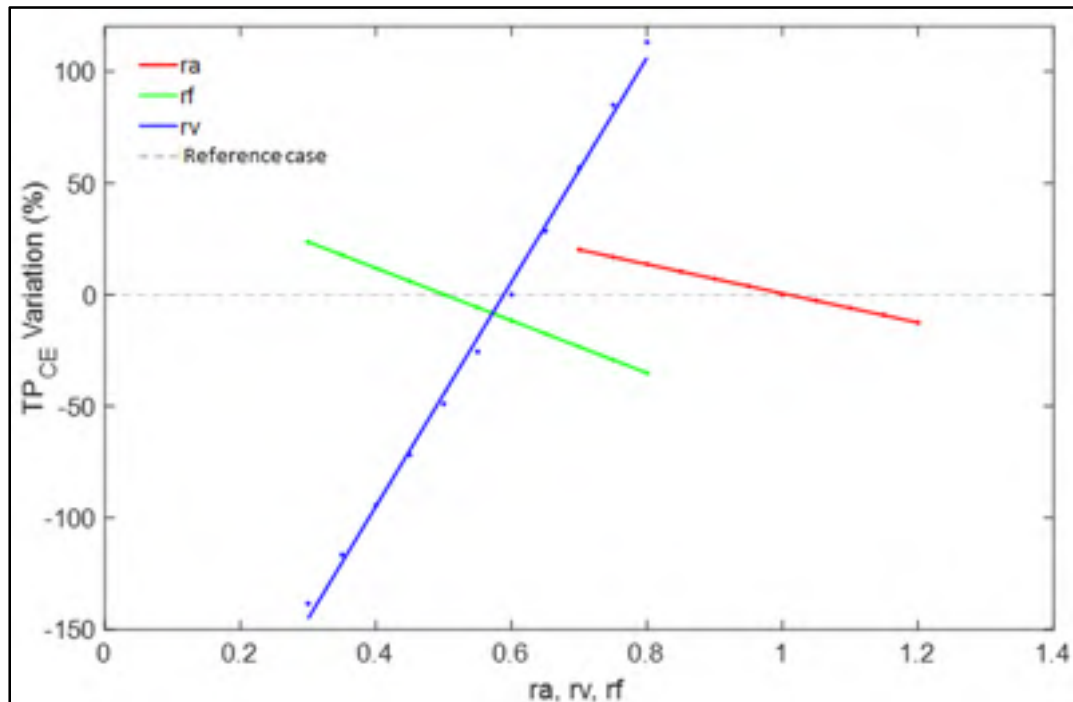


Figure 2.11 TP_{CE} variation for different values of r_a , r_v and r_f

Logically, as shown in Figure 2.11, the sale price of remanufactured products and components has a significant influence on the TP_{CE} generated. Remanufactured products must be sold at a minimum price in order to be profitable (here $r_v > 0.38$). Naturally, TP_{CE} also decreases as the costs of remanufacturing and purchasing EOL products increase. In Figure 2.11, these variations are linear, which can be explained by the definitions of the different costs and revenues that set the objective function.

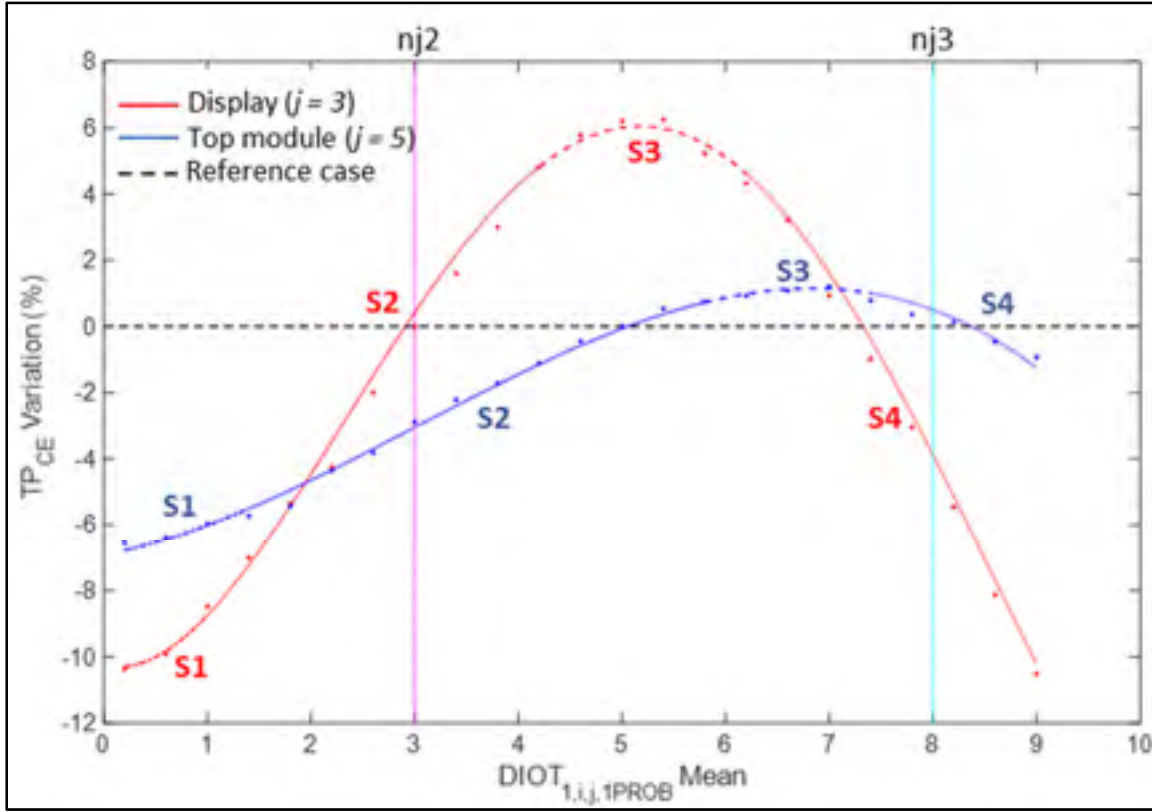


Figure 2.12 TP_{CE} variation for different values of $diot_{1,i,j,tPROB}$

In Figure 2.12, For each of the variations, four sections can be identified. The first is when the average of $diot_{1,i,3,tPROB}$ is low (S1), TP_{CE} increases slowly because the average of $diot_{1,i,3,tPROB}$ is lower than $nj2$: the majority of the display modules are recycled. However, as soon as the display module is recycled, the financial gain will be the same regardless of its condition, and only a few display modules will be remanufactured. At the section 2 (S2) level, TP_{CE} increases more quickly with increasing average. More display modules are being remanufactured; and their $diot_{1,i,3,t}$ is not too high, so returned products are not purchased at a high price. Moreover, a high $diot_{1,i,3,t}$ means cheaper remanufacturing. In section 3 (S3), the display modules become in a very correct condition with $diot_{1,i,3,tPROB}$ which is close to $nj3$ on average. Therefore, more and more components are being reused without remanufacturing the $diot_{1,i,t}$ is increasing and the purchase price $r_{1,i,t}$ is becoming more expensive. This

repurchase price is beginning to overtake the gains obtained by reducing the remanufacturing cost. In section 4 (S4), returned products are purchased at important $r_{1,i,t}$ prices due to the good average of $dIoT_{1,i,tPROB}$ exceeding $nj3$. A significant proportion of the display modules are reused, confirming the trend observed in section 3 (S3).

For the variations $dIoT_{1,i,5,tPROB}$, related to the camera module, the observation is the same, but the variations are less important. Indeed, the camera module costs less than the display module, its importance $weight_{1,5}$ has less influence on the cost $r_{1,i,t}$ and it is less expensive to remanufacture.

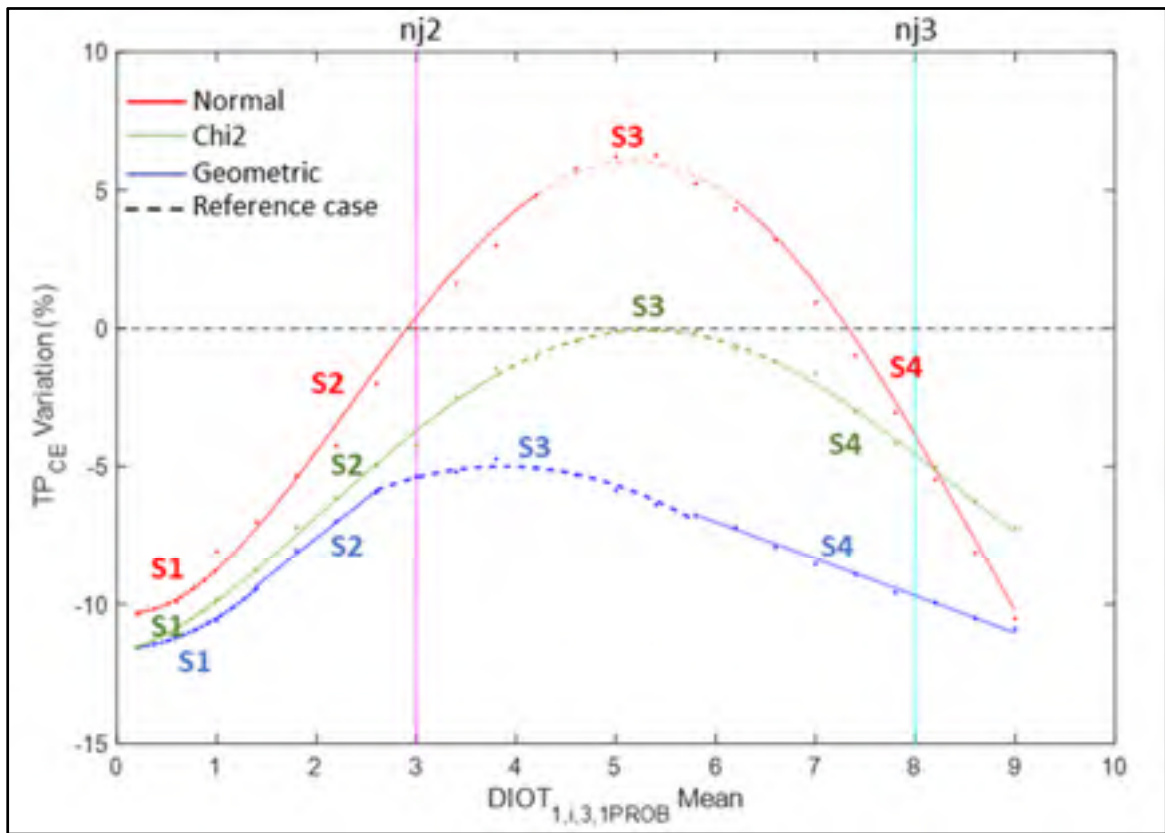


Figure 2.13 TP_{CE} for different probability distributions of $dIoT_{1,i,3,tPROB}$

For comparison between the different probability distributions, with the geometric and χ^2 (chi2) distributions; we observe the same sections as with the normal distribution, as shown in

Figure 2.13. However, the variations are smaller for the latter two because they are less centered on their mean value and their distribution is more uniform. Therefore, for the same reason the profit TP_{CE} is not as high as with the normal distribution. Indeed, the $d_{iot_{n,i,5,tPROB}}$ following the geometric and chi2 laws cannot target the most advantageous value with the same accuracy than the normal distribution.

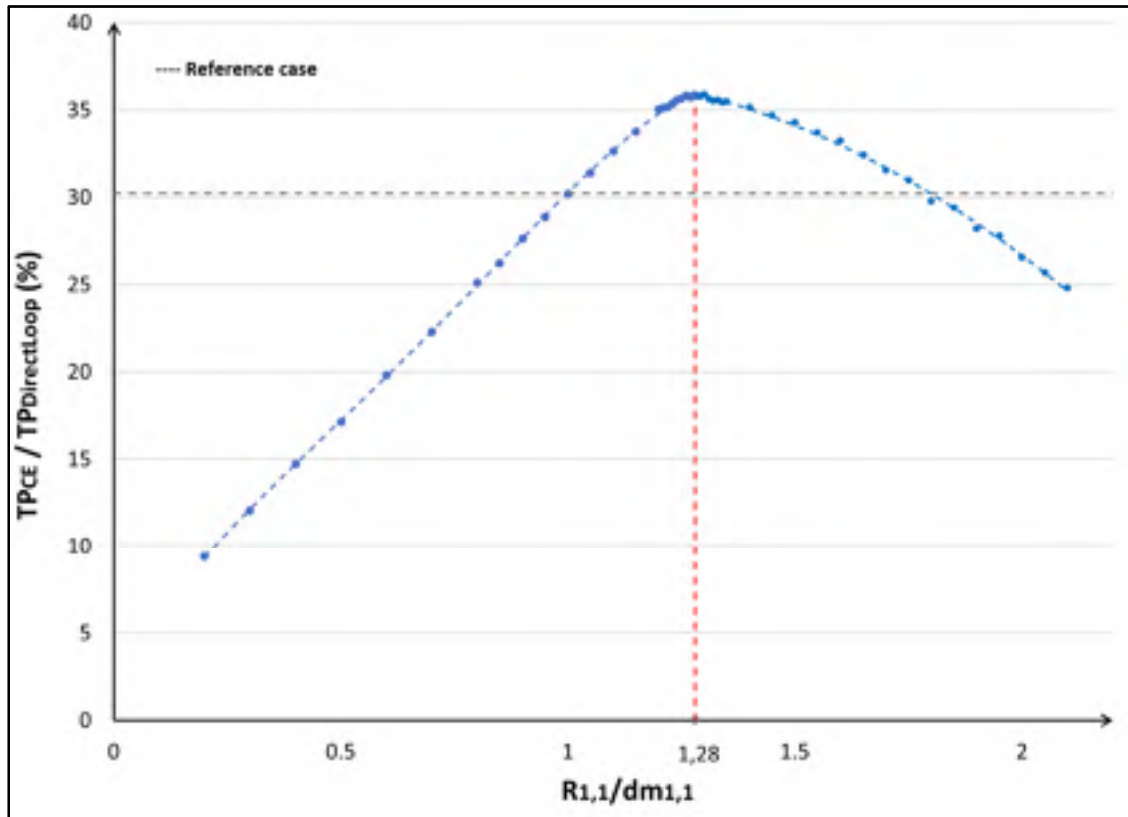


Figure 2.14 $TP_{CE}/TP_{DirectLoop}$ (%) for different quantity of EOL products recovered

The profit generated by the CE evolution according to the number of returned products purchased $R_{1,1}$ in relation to demand $dm_{1,1}$, given in Figure 2.14, has a maximum of 1.28 $R_{1,1}/dm_{1,1}$. Before this value, the profit increases with the number of EOL products purchased, due to the necessity to manufacture many new components to meet the demand for remanufactured products because the recovery is not large enough. After this value, the number of products purchased is excessive and components and products are recycled whereas they

were purchased at a high price and could have been remanufactured. The Circular Economy approach would increase total profit by 36% compared to the current model of Fairphone, which doesn't deploy a CLSC.

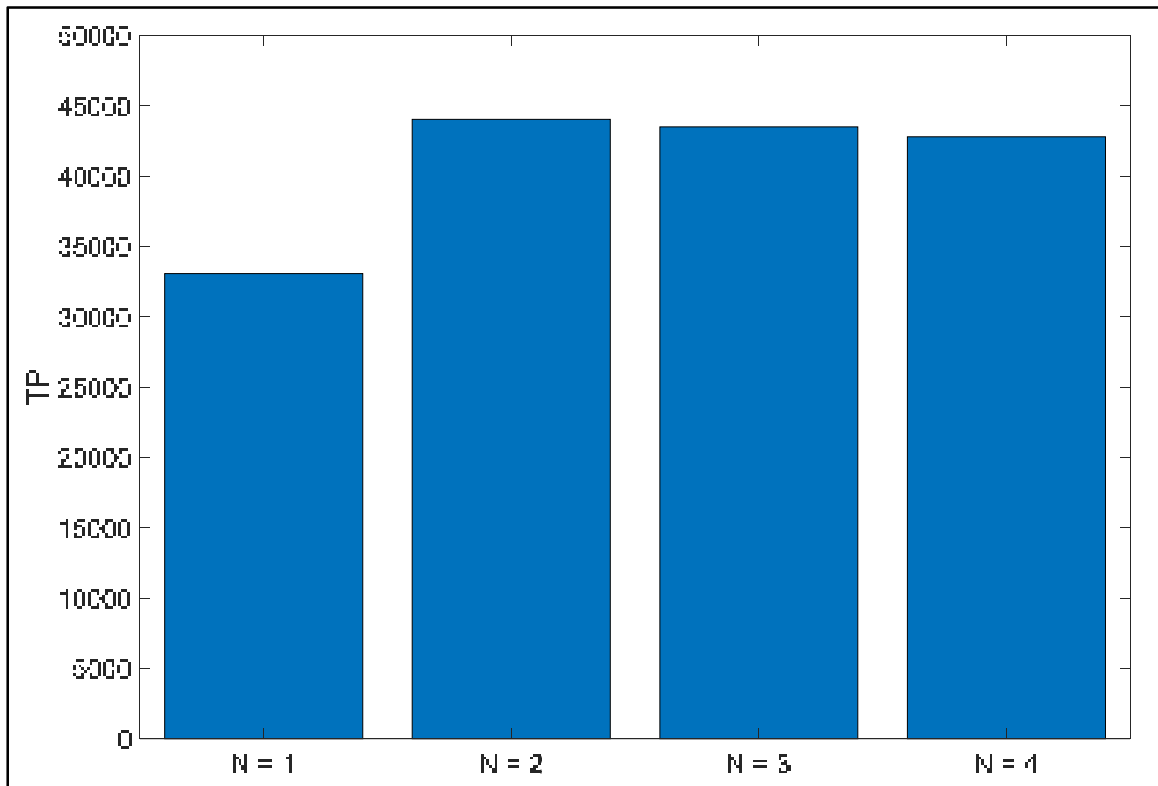


Figure 2.15 Total profit according to the number of products proposed

The increase in the number of products in the Fairphone range increases the profit generated as shown in Figure 2.15. Indeed, the additional products created for the study are more expensive, which explains this trend. It can be concluded that the CLSC is resilient in the case of several products, enabling it to satisfy the mass-personalization needs of customers in the context of Industry 4.0. We looked at the sensitivity of our model in the case where the company takes over all available EOL products without making a selection before purchasing them. If we are in the case where EOL products outnumber the demand for remanufactured products, we see in Figure 2.14 that profit declines. However, it is also possible to optimize the profit in this case.

2.6.9 Optimal EOL product selection

The objective is to further optimize the product recovery because it is one of the main constraints of circular manufacturing.

Knowing the condition of all recoverable products with DIOT, the best selection of products could be chosen to meet the demands, avoiding EOL products bought too expensively, or those with components too expensive to remanufacture. Consequently, it is considered that not all available end-of-life products are necessarily purchased from the S&C Centre. We thus define the binary variable $nus_{n,i,t}$ which indicates whether the product is purchased.

$$nus_{n,i,t} = \begin{cases} 1 & \text{if the EOL product is not purchased by the company} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.53)$$

The Equation (9) becomes:

$$dis_{n,i,t} + rec_{n,i,t} + was_{n,i,t} + mis_{n,i,t} + nus_{n,i,t} = 1, \forall(t, n, i). \quad (2.54)$$

The total purchase cost TPC in Equation (24) then becomes:

$$TPC = \sum_t \sum_k pm_k \cdot M1_{k,t} + \sum_t \sum_n \sum_i (1 - nus_{n,i,t}) \cdot r_{n,i,t}. \quad (2.55)$$

The evolution of the profit generated by the Circular Economy as a function of the number of EOL products available on remanufactured product demand is shown in Figure 2.16. This evolution has an asymptotic behaviour towards 48% when EOL recovered products are selected in relation to their *diot*. In comparison, as mentioned previously, without selection of EOL products, the total benefit increases by a maximum of 36%.

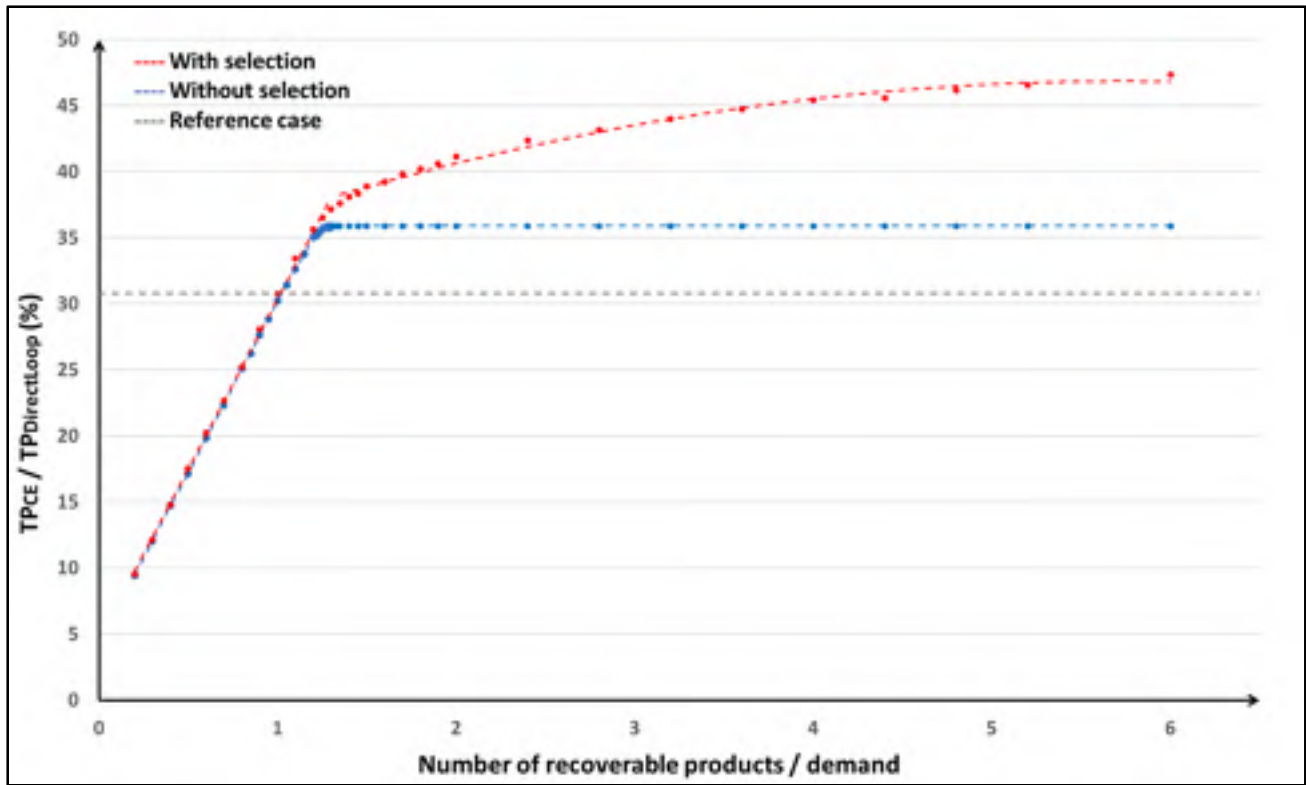


Figure 2.16 $TP_{CE}/TP_{DirectLoop}$ (%) with and without the possibility to select the returned products

This behaviour can be explained because a larger number of EOL products that can be purchased enables a more judicious selection that will increase profit. At a certain point, the number of recoverable products is large enough in relation to the demand for remanufactured products, and a greater choice does not significantly improve the quality of the selection, hence the asymptotic behaviour. Then, the $nus_{n,i,t}$ value indicates to the company if it should buy an EOL product or not.

2.7 Conclusion

This study showed that use of IoT principles was beneficial in optimizing the profit of a company adopting a CLSC, enabling cleaner and more sustainable production. Currently, one of the main problems of CLSCs is managing the recovery of EOL products to supply the

remanufacturing workshops. The products arrive in uncertain conditions and require inspection processes.

The main contributions of this study from the managerial perspective of CLSCs in Industry 4.0 are concluded by answering its research questions. The first is an optimal multi-product and multi-period planning method for raw material, component supply based on IoT. Indeed, the data collected during the life cycle of a product using sensors and communicated via RFID tags can be used to determine the status of an EOL product and its components. The developed model enables the best possible choice of component and product treatments such as recycling, remanufacturing, disassembly or reuse without any inspection. The second is an optimal selection of recoverable EOL products that can be used to meet the demand for reconditioned products. The solution provides the combination of products purchased to maximize total profit by considering the cost of purchasing from their owners and the remanufacturing cost. An example of modular smartphones, the Fairphone, was considered to illustrate the resolution of the model. In this example, where remanufactured product demand accounts for 40% of total demand, the total profit increased by 36% thanks to the CE when the recovered EOL products are randomly selected; and up to 48% if the EOL products to be recovered are optimally selected. In addition, the need for primitive raw materials has decreased due to the product recovery.

It should be noted that this study is based on a strong hypothesis, that devices such as sensors on physical objects can collect data to determine the state of an EOL product without inspection, i.e. its *diot*. Future research should concentrate on making this link between an assigned *diot* based on sensor inputs during the product's life cycle and the actual (mechanical) state of a product. It would also be interesting to study the impact on the CLSC of a demand and a quantity of EOL products recovered fluctuating over different periods.

In the following part of this thesis we will propose an approach to predict the state of degradation of end-of-life products, i.e. a *diot* prediction.

CHAPITRE 3

VERS LA PRÉVISION DE L'ÉTAT DE DÉGRADATION DES PRODUITS EN FIN DE VIE

3.1 Introduction

Au chapitre précédent, nous avons vu que pour mettre en place un modèle de chaîne d'approvisionnement en boucle fermée s'appuyant sur un système intégré de prédiction de l'état de récupération d'un produit en fin de vie. Il fallait surmonter le défi que représente cette prédiction. C'est-à-dire, en reprenant le concept développé dans ce mémoire, le principal défi est le calcul du *díot* de chacun des composants dans la réalité.

Ce calcul pourrait être réalisé grâce aux technologies numériques. En effet, ces technologies facilitent le développement de l'Économie Circulaire en permettant la collecte et l'analyse de données aboutissant à un suivi de l'état d'un produit et à un choix de reconditionnement. Les outils qui peuvent être utilisés sont l'Internet des Objets, la Big Data et l'intelligence artificielle pour citer les principaux (Uçar et al., 2020). Les chercheurs ont commencé récemment à s'intéresser à l'apport de ces technologies pour les différents traitements de récupération des produits en fin de vie. Cependant, aucune étude de cas réel n'étant disponible à ce jour, il convient de s'attaquer à ce problème.

Dans la suite de ce chapitre, nous présenterons des pistes de recherche pour déterminer le *díot* d'un composant à l'aide de ces outils intelligents. Nous regarderons plus en détail la méthode à appliquer pour le cas d'un composant réel, un écran en verre d'un smartphone, afin de faire écho à l'étude de cas du chapitre précédent traitant des smartphones de la marque Fairphone.

3.2 Le *díot* : reflet de l'utilisation des consommateurs

Afin de créer un produit s'inscrivant dans le modèle de l'Économie Circulaire, il est nécessaire d'inclure les consommateurs, leurs habitudes et leurs modes de consommation d'un produit

donné dans la démarche de récupération et de traitement des produits. Dans le cas d'un écran de smartphone, il est ainsi primordial d'identifier ce qui pousse les consommateurs à vouloir changer de smartphones.

Il est donc nécessaire de déterminer à partir de quel niveau de dégradation le produit n'est plus utilisable dans une suffisamment bonne condition. En 2014, Schaub et al. ont étudié les dégâts subis par des écrans tactiles de smartphones et les conséquences sur leur utilisation. L'étude révèle certains comportements des utilisateurs. Ainsi 23% des propriétaires de smartphones utilisent un appareil avec un écran cassé. Selon les types de dégâts subis par l'écran, illustrés sur la Figure 3.1, l'utilisateur n'aura pas la même tolérance pour continuer d'utiliser son smartphone sans réparation. C'est le type de dégât et la gravité de celui-ci, mesurer par exemple par la proportion de la surface de l'écran qui est affecté par ce défaut, qui va pousser l'utilisateur à changer de smartphone.

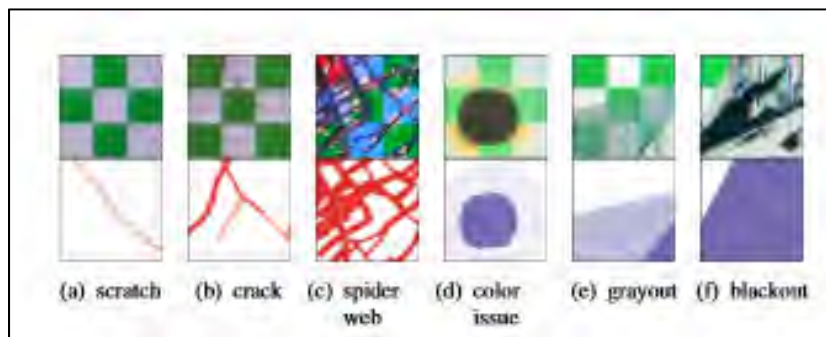


Figure 3.1 Dégâts typiques présents sur les écrans de smartphone (Schaub et al., 2014)

Une des autres principales raisons qui encourage les utilisateurs à se séparer de leurs smartphones endommagés est une proposition de changement de téléphone par les constructeurs ou les opérateurs (Ikemiya & Rosner, 2013). Prédire l'état de dégradation d'un téléphone serait un avantage commercial de taille pour un fabricant, qui pourrait alors récupérer un produit au moment où l'interaction entre le produit et l'utilisateur est trop dégradé, tout en proposant l'achat d'un nouveau produit. De plus, il a été souligné au chapitre 2 de ce mémoire le fait qu'une connaissance de l'état de dégradation du produit grâce au *díot* permettrait de se soustraire à une étape d'inspection au moment de la récupération du produit.

Éviter cette étape préliminaire constituerait un avantage économique pour le fabricant. La connaissance du *diot* a donc des intérêts économiques multiples, et il convient de discuter à des méthodes pour l'obtenir.

3.3 Le *diot* : reflet d'une réalité mécanique

La dégradation d'un écran de smartphone, sa perte de fonctionnalité et la diminution de son confort d'utilisation sont donc essentiellement déterminé par la présence ou non de fissure ainsi que des dégradations locales de la matière qui le compose. Le verre est l'élément principal des écrans de smartphones et c'est sa dégradation qui influe sur la qualité de l'affichage de ceux-ci (Magomedov, Orlova, Lisichko, & Alikhadzhiev, 2019). Le *diot*, reflétant l'état du composant, est ainsi lié aux propriétés physiques et mécaniques des matériaux, le verre dans cet exemple.

Des recherches ont été entreprises sur les verres spéciaux utilisés dans les domaines de pointes comme les hautes-technologies et dont les applications sont de plus en plus nombreuses (Wondraczek et al., 2011).

Parmi les principaux constructeurs de smartphones, on peut citer Apple et Samsung. Ces deux géants de l'industrie du smartphone utilisent deux types de verres pour leurs écrans : le verre saphir et le verre Gorilla (Lunden, 2016). Chacun de ces deux types de verres possèdent leurs avantages et leurs inconvénients dans leurs utilisations. Le saphir a une dureté plus élevée et moins cassant que le verre trempé chimiquement comme le Gorilla glass (Corning, 2020) ou le Xensation glass (Schott, 2020). Il est donc plus résistant aux fractures et plus difficiles à rayer. Mais les verres Gorilla et Xensation ont l'avantage d'être trois fois moins chers que le saphir (Magomedov et al., 2019). Ces verres sont particulièrement résistants grâce à leur procédé de fabrication : les ions sodium du verre sont remplacés par des ions potassiums plus gros lors d'un chauffage du verre dans un bain de sel minéraux. Ces ions, plus gros, créent une compression dans le verre qui le rend plus solide (Corning, 2020).

Les méthodes d'étude de la propagation des fissures dans le verre peuvent être séparées en deux grandes catégories, les méthodes expérimentales et les méthodes de simulation par éléments finis.

Les méthodes expérimentales sont plus fiables mais prennent plus de temps et sont plus coûteuses que les simulations numériques, demandant plusieurs semaines de préparation supplémentaires (Ghazaly, Abdo, Dakshinamoorthi, & Srinivasan, 2011). Il est néanmoins possible d'arriver à des résultats précis du phénomène de propagation des fissures par simulation car le phénomène est bien connu physiquement. Lorsqu'une fracture est présente dans un matériau, selon la direction de la contrainte par rapport à l'orientation de la fissure, au-delà d'une certaine contrainte σ_c défini par le critère de Griffith, le matériau fragile se rompt (Griffith, 1921).

La Figure 3.2 présente cette mécanique pour une fissure soumise à une contrainte uni axiale qui lui est perpendiculaire. Cette contrainte critique étant inversement proportionnelle à la racine de la longueur de la fracture, déterminer la taille des fractures de l'écran en verre lors de l'inspection est primordial pour quantifier son état de dégradation.

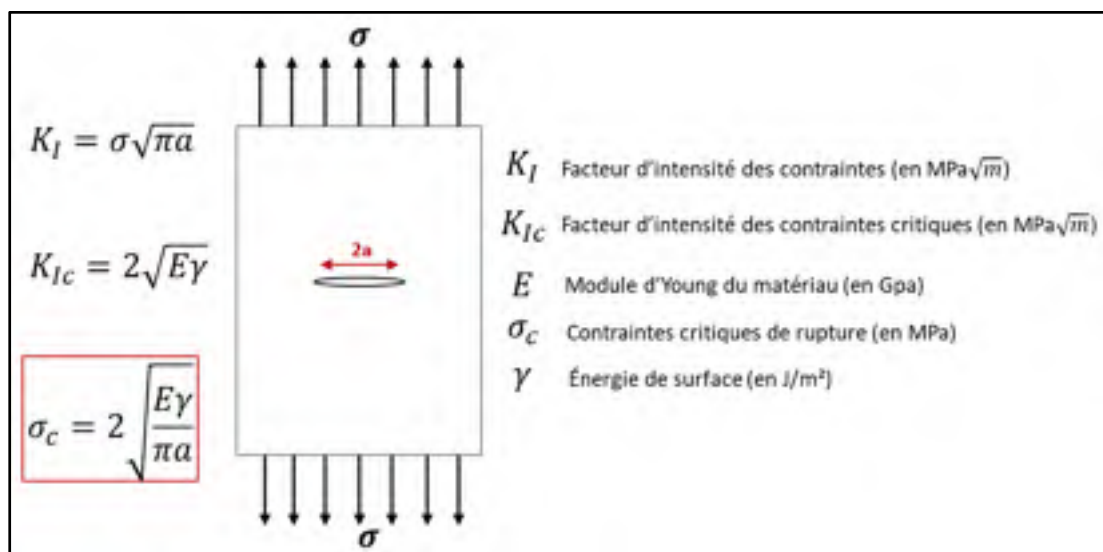


Figure 3.2 Critère de Griffith pour une fissure de longueur $2a$ soumise à une contrainte uni axiale qui lui est perpendiculaire dans une plaque infinie

Mais les simulations ne sont pas suffisantes pour établir et valider un modèle. Les méthodes de simulation par éléments finis peuvent néanmoins être utilisées comme outil de prédiction (Ghazaly, 2011). Ainsi, dans le but de déterminer un modèle qui permettra de réaliser des prédictions de l'état du verre d'un écran de smartphone, il serait nécessaire d'acquérir dans un premier temps des données expérimentales suffisantes reliant les paramètres et les conditions environnantes d'utilisation à l'état de dégradation de l'écran, c'est-à-dire à la quantité et la taille des fissures présentes sur celui-ci. Une fois le modèle établi, on pourra l'utiliser pour faire des prédictions sur la taille des fissures sur un écran selon les conditions subit par le verre.

3.4 Détecter les dégradations

L'acquisition de données expérimentales est donc une étape clé afin de modéliser la dégradation des écrans de smartphones. Des méthodes permettant d'inspecter la qualité du verre des écrans de smartphones existent déjà. En effet, avec l'explosion du secteur de la téléphonie mobile, le contrôle de la qualité du verre est devenu un enjeu économique majeur. Les industriels ont donc développé des méthodes d'inspections des défauts du verre des écrans après leurs fabrications. Les inspections visuelles par un opérateur humain sont les méthodes les plus répandues mais elles sont fastidieuses, peu précises et dépendent grandement de l'opérateur qui les réalise (Jian, Gao, & Ao, 2017). Les recherches se sont ainsi portées vers des méthodes de détection visuelles des défauts par intelligence artificielle basés sur des systèmes de reconnaissances d'image (Li, Liang, & Zhang, 2014).

La reconnaissance d'image est une méthode de traitement automatique de l'image d'un objet réel grâce à un dispositif optique qui a pour but d'extraire l'information voulu de cette image (Bharath & Petrou, 2009). Le système d'inspection s'appuie sur une caméra captant l'image sous une source de lumière appropriée. Un algorithme va ensuite traiter cette image afin de déterminer les caractéristiques de celle-ci. La caractéristique qui nous intéresse ici est la présence de défaut. L'algorithme va donc ainsi identifier, compter, mesurer et classer les

différents défauts présents sur l'écran en verre (Martínez, Ortega, García, García, & Estévez, 2013).

Le traitement de l'image se compose du débruitage de l'image, de l'amélioration, de la restauration et enfin la détection des défauts (Yuan et al., 2018). L'image prétraitée permet à un ordinateur de reconnaître plus facilement les défauts, améliorant la précision de détection. Il faut choisir les éléments caractéristiques des défauts afin de les repérer. Dans le domaine de la reconnaissance d'image, les principaux aspects qui peuvent être détectés sont principalement les couleurs (Singh, Dua, Agrawal, & Acharya, 2013) et les formes géométriques (Gao et al., 2017). Il faut s'intéresser à plusieurs de ces composantes pour réaliser correctement une reconnaissance d'image (Liu, Chen, Peng, & Xie, 2011; Malamas, Petrakis, Zervakis, Petit, & Legat, 2003).

Dans le cas de la détection des défauts sur du verre, on peut noter quelques difficultés (Murdoch, Singh, Kumbier, Abbasi-Asl, & Yu, 2019). L'éclairage de la pièce en verre à inspecter est primordial pour détecter les variations dans la couleur du verre à cause de possibles défauts. Un système d'éclairage stable serait nécessaire (Pourmoghaddam & Schneider, 2018). De plus, les défauts dans le verre ont tendance à se superposer ce qui rend encore plus difficile leur identification (Ngo et al., 2018). Ces difficultés font que les technologies de détection de défauts dans le verre sont un peu en retard vis à vis d'autres matériaux (Martínez et al., 2013). Ces méthodes sont encore plus en retard dans le cadre de la détection de défauts sur des écrans de smartphones car les défauts qui peuvent apparaître sont très variés : les rayures, les coupes d'angle, les déformations, les fissures et les bords cassés.

Ming et al. (2019) ont résumé le processus complet d'identification des défauts sur un écran en verre en détaillant chacune des étapes indiquées sur la Figure 3.3. On y voit les différentes étapes : l'acquisition de l'image, le pré-traitement, la segmentation, l'extraction des caractéristiques et la classification.

Plus précisément, le pré-traitement possède deux étapes : le débruitage obtenu par méthode morphologique et filtre d'ondelettes (Yousefian-Jazi, Ryu, Yoon, & Liu, 2014) ; et l'amélioration de l'image qui se fait filtrage dans les domaines des fréquences et le domaine spatial. La classification sera réalisée par les algorithmes classiques d'apprentissage machine supervisés ou non-supervisés : Méthode des K plus proches voisins, réseaux de neurones artificiels ou classification naïve bayésienne (Liu et al., 2011 ; Kang et al., 2015). Le choix des méthodes dépend du type de données.

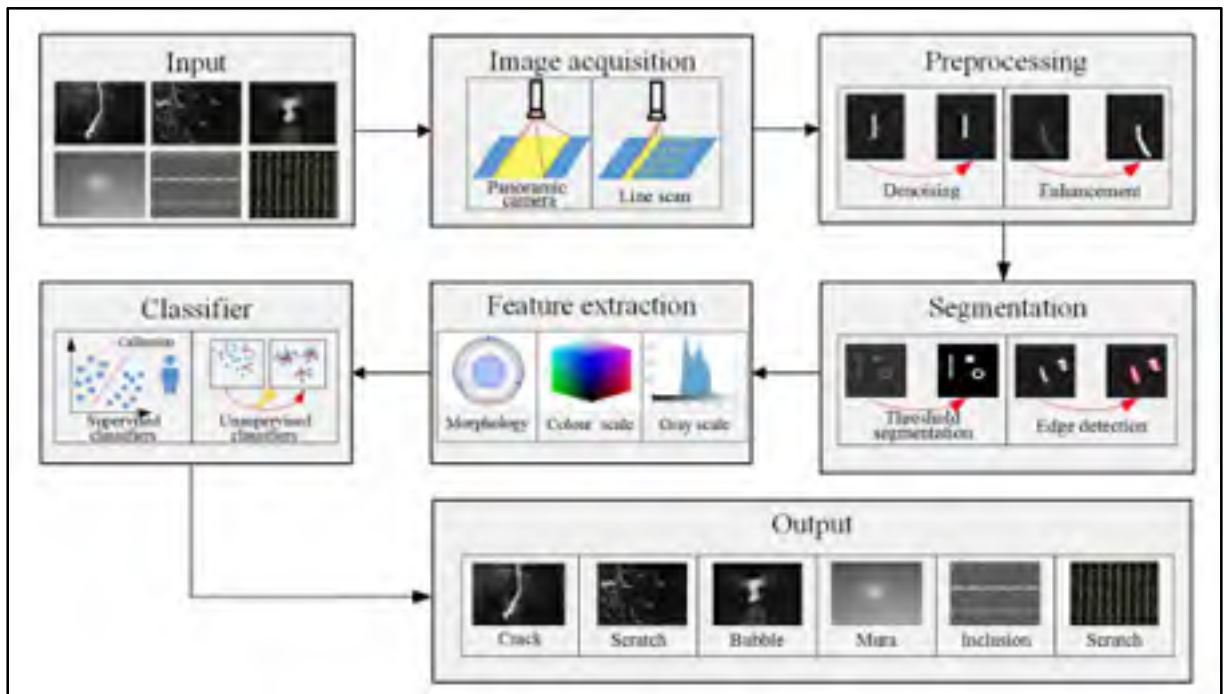


Figure 3.3 Processus de détection des défauts d'une surface en verre (Ming et al., 2020)

De cette manière, la dégradation d'un composant, ici un écran de smartphone, serait quantifiée et mesurée. On pourrait alors déterminer le besoin ou non de le réparer. Mais la détection des défauts n'est pas suffisante pour établir le *diot*. En effet, l'objectif est de détecter les défauts sans avoir à faire cette étape d'inspection, en se basant uniquement sur la vie du produit.

3.5 Prédire les dégradations

Le but du *diot* est donc de fournir avec précision un modèle prédictif de l'état de dégradation des produits en fin de vie. On a vu qu'une inspection de ces produits permettaient de détecter les défauts et de les quantifier. Dans le cas des écrans de smartphones, les algorithmes de reconnaissance d'image seraient d'une grande aide. Afin d'établir un modèle prédictif de la dégradation qui contrôlera les décisions d'approvisionnement, de recyclage ou de refabrication, il faut associer les résultats de cette inspection aux données liées aux conditions d'utilisation du produit.

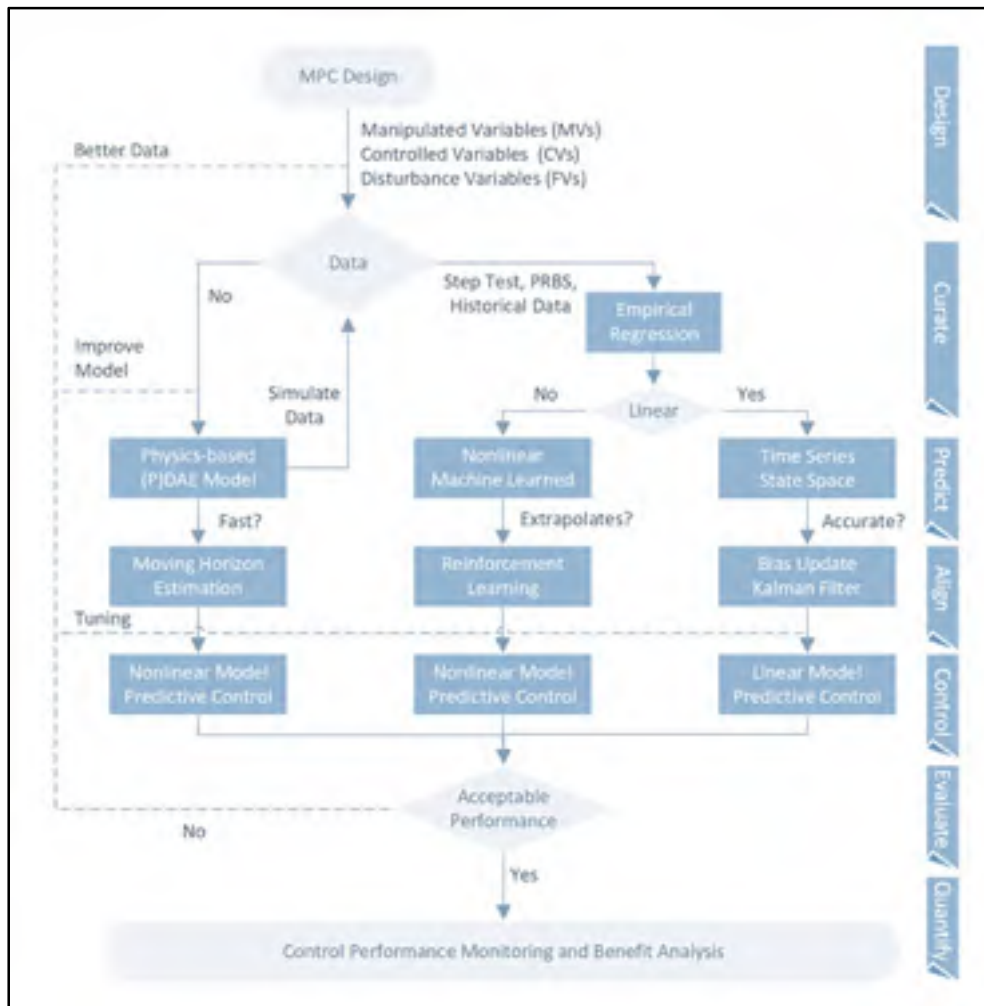


Figure 3.4 Conception d'un modèle prédictif de contrôle (Beal, Hill, Martin, & Hedengren, 2018)

On peut imaginer que chaque produit peut être soumis à des conditions excessivement différentes durant leurs cycles de vie, notamment pour un produit soumis à des conditions environnantes extérieures, à des événements imprévisibles et par des utilisateurs aux habitudes bien différentes. C'est le cas d'un smartphone. Cette variabilité rend difficile l'élaboration d'un modèle. Néanmoins aujourd'hui, les progrès en termes d'intelligence artificielle permettent de créer des modèles à partir de données complexes et variées (Hedengren, Shishavan, Powell, & Edgar, 2014; Murdoch et al., 2019), ce qui serait le cas dans la détermination du *diot*. Parkinson et al. (2013) décrivent la méthode pour établir un modèle par apprentissage machine (machine learning) selon la quantité de données disponibles, la linéarité ou non du modèle de prévision. Il sera nécessaire de vérifier les résultats obtenus afin d'améliorer et d'établir ce contrôle par modèle prédictif (Model Predictive Control, MPC). Beal et al. (2018) ont résumé la validation du modèle avec la Figure 3.4.

Dans le cas de la prévision de la dégradation d'un écran en verre, on peut à la fois s'appuyer sur des modèles physiques de la mécanique de la rupture, mais réaliser des tests permettrait d'avoir de meilleures prévisions. Une fois que les données seront en nombres suffisantes et donneront des résultats acceptables, on pourra envisager un système de contrôle de la chaîne d'approvisionnement basé sur les valeurs du *diot*.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu différents facteurs qui rentrent en compte dans l'estimation du *diot*. L'utilisation des composants par les utilisateurs est à la base de la démarche. C'est ce comportement qui va définir à quel moment un utilisateur est prêt à céder le produit car ce dernier n'offre plus des conditions d'utilisation suffisantes. Ce comportement permet aussi de définir les défauts à réparer impérativement avant de remettre le produit sur le marché. Dans le cas d'un écran de smartphone, les défauts sont les fissures plus ou moins grandes qui gênent la visibilité de l'affichage, empêchant ainsi l'interaction entre l'utilisateur et la machine.

Ces défauts découlent de phénomène physique divers. Dans le cas de l'écran de smartphone, la mécanique de la rupture est une des clés de la prévision de l'état du produit en fin de vie. Mais les paramètres d'utilisation d'un smartphone sont extrêmement variés et cette utilisation s'étend sur une longue période de temps. Les modèles classiques de la physique ne permettent pas de rendre compte de l'état réel de l'écran en verre. Il faut donc se tourner vers des modèles empiriques, que l'on peut obtenir grâce à une collecte massive de données, possibles grâce à l'IoT et des capteurs sur le produit. Pour le cas de l'écran de smartphone, des systèmes de reconnaissance d'images pourront identifier et quantifier la taille des défauts. Il faut ensuite relier ces données aux conditions auxquelles a été soumis l'écran, notamment les contraintes mécaniques, mais aussi la température et l'humidité. Ces données, une fois traitées par des algorithmes d'apprentissage machine, pourront fournir des modèles prédictifs du *diot*. Une fois le modèle déterminé, il pourra être en permanence amélioré en continuant cette collecte de données. La chaîne d'approvisionnement en boucle fermée pourra alors être contrôlée par la prédiction de l'état de dégradation des produits FDV donnée par une valeur du *diot* fiable et reflétant l'aspect réel du produit.

CONCLUSION

L'approche linéaire de l'économie est la manière dont les humains ont abordé la production et la consommation de biens. Mais cette vision de l'économie mène inexorablement à l'épuisement des ressources naturelles minières et énergétiques. La consommation mondiale en ressources est désormais telle que lesdites ressources ne peuvent plus se régénérer. Nous nous rapprochons de plus en plus rapidement de cet épuisement. Aussi, il est nécessaire de concevoir un nouveau mode de production et de consommation pouvant s'inscrire dans l'écosystème.

Dans le chapitre 1, nous avons d'abord passé en revue la littérature touchant aux différents champs liés à la recherche entreprise dans ce mémoire. Nous avons présenté le concept d'Économie Circulaire. Cette approche circulaire vise l'optimisation des ressources tout au long du cycle de vie du produit. Cette Économie plus durable peut entraîner des retombées environnementales, économiques et sociales. Mais l'Économie Circulaire n'en est qu'à ses débuts et de nombreux obstacles empêchent une application globale de ses stratégies comme le recyclage, le reconditionnement et la réutilisation des produits. Le principal défi étant la récupération des produits en fin de vie.

L'Industrie 4.0 et ses technologies numériques peuvent permettre de surmonter cet obstacle. En effet, elles peuvent faciliter la sélection des produits FDV, et elles peuvent aussi être à l'origine de l'Économie Circulaire grâce à l'Internet des Objets : les produits connectés permettraient une surveillance de leur état de dégradation. On pourrait alors contrôler le retour des produits FDV. La chaîne d'approvisionnement comprendrait ainsi une chaîne de retour qui se bouclerait avec la chaîne directe de production et de distribution : on parle de chaîne d'approvisionnement en boucle fermée (CLSC). Il serait alors possible avec l'Industrie 4.0 de construire l'Économie Circulaire sur ce type de chaîne d'approvisionnement durable. Nous avons donc défini plus précisément les chaînes d'approvisionnement en boucle fermée et le principe de logistique inverse. Nous avons mis en évidence le manque de recherches sur les outils décisionnels au niveau opérationnel des CLSC considérant toutes les stratégies de

l'Économie Circulaire. Nous avons aussi souligné l'absence d'optimisation de récupération des produits FDV grâce à la prévision de l'état de dégradation.

Dans le chapitre 2, nous avons présenté un modèle de CLSC prenant en compte toutes les stratégies de l'Économie Circulaire, considérant plusieurs produits, de l'extraction de la matière première au produit final, en passant par la fabrication des composants et leurs assemblages. On a appelé Fabrication Circulaire (Circular Manufacturing) cette considération de l'Économie Circulaire au niveau de la fabrication et de la refabrication des produits. Nous avons ensuite créé un moyen de contrôle des produits durant leur vie basée sur l'IoT, pour prédire l'évolution de leur état de dégradation.

L'écriture d'un modèle mathématique en programmation linéaire mixte qui régit le comportement de la CLSC développée a permis l'optimisation des flux de matières premières, composants et produits. La sensibilité de ce modèle a été étudiée avec un cas concret, celui des smartphones de la marque Fairphone. On a ainsi obtenu modèle de prise de décision opérationnelle, pour la récupération des produits en fin de vie afin d'optimiser les CLSC dans le contexte de l'Industrie 4.0.

Dans le chapitre 3, nous avons proposé une démarche pour définir un modèle de prédiction de l'état de dégradation des produits FDV. Établir ce type de modèle demanderait d'étudier à la fois le comportement des utilisateurs face aux dégâts sur les produits afin de savoir quand ils seraient prêts à se séparer de leurs produits. Il serait aussi nécessaire de quantifier la dégradation des produits FDV. Pour un écran de smartphone par exemple, des systèmes de reconnaissances d'images peuvent classer les dégâts selon différentes catégories et mesurer l'étendue de ceux-ci. Un système de prévision nécessite de faire le lien entre la vie du produit et l'état de dégradation. Les algorithmes d'apprentissage machine peuvent établir des modèles réalisant ce lien malgré le nombre important de variables pouvant influencer l'état de dégradation. Ce modèle de prédiction permettrait de contrôler la boucle de retour de la chaîne d'approvisionnement en boucle fermée en indiquant au fabricant l'état de dégradation du produit.

RECOMMANDATIONS

Les travaux réalisés dans la cadre de ce mémoire ouvrent des perspectives de recherche prometteuses. Nous décrivons brièvement ci-dessous quelques pistes qui nous semblent intéressantes pour la logistique inverse en boucle fermée. Les extensions possibles pour le modèle décrit au chapitre 2 sont les suivantes :

- Estimer l'impact de la mise en place du modèle de chaîne d'approvisionnement du chapitre 2 sur l'émission de gaz à effet de serre.
- Dans le modèle du chapitre 2, étudier l'impact d'une quantité variable de produits FDV disponibles pour récupération et d'une demande variable en produits refabriqués.
- Déterminer les *díot* d'un produit réel et de ses composants en se référant à la démarche présentée au chapitre 3, afin de mesurer les bénéfices économiques avec le modèle du chapitre 2 avec des données mesurées réellement.
- Établir des processus de refabrication de produits en fin de vie : technologies utilisées, réalisation, temps nécessaires, besoins en matières premières et en énergie, coûts...
- La collecte massive de données pour réaliser le modèle du chapitre 2 demande l'utilisation de serveurs informatiques comme centre de données. Ces centres de données doivent être refroidis par des systèmes de climatisation consommant beaucoup d'énergie (ADEME, 2017). La chaîne d'approvisionnement proposé visant à réduire l'impact des activités humaines sur l'environnement, il serait intéressant d'estimer le coût environnemental de cette récupération des données.

ANNEXE I

PROGRAMME LINGO POUR L'ÉTUDE DE CAS

MODEL:

!CLSC with remanufacturing and DIOT;

SETS:

PROD_T /I1..I100/;

P_RANGE /N1/ : P_stockinn, NP_stockinn, h1n, h2n, eln, an, dn, P_stockmaxn,
NP_stockmaxn, g1n, g2n, g3n, g4n, g5n, g6n, scpn, rpan;

COMPONENT /J1..J10/ : mj, ej, h1j, h3j, h4j, UC_stockinj, UC_stockmaxj, NC_stockinj,
NC_stockmaxj, g7j, g8j, g9j, g10j, g11j, g12j, g13j, g14j, g15j, g16j, g17j, sccj;

MULTI (P_RANGE, COMPONENT) : weightnj, cnnj;

RAW_MAT/ K1..K27/: h4k, h5k, h6k, h7k, rpk, rck, pmk, RM_stockink, RM_stockmaxk,
g18k, g19k, g20k, g21k, scmk, rcmk;

PERIOD /T1/;

RANGE_DEM(PERIOD, P_RANGE) : dmnt, dmnnt, Rnt, Qnt, Vnt, Znt, Pnt, Unt, Knt, Fnt,
P_stocknt, NP_stocknt;

PRODUCT (PERIOD, P_RANGE, PROD_T) : diotnit, disnit, recnit, wasnit, rnit, dv_prod1nit,
dv_prod2nit, dv_prod3nit, useless1nit, useless2nit;

ROUTE (PERIOD, COMPONENT) : Mjt, Xjt, Yjt, Cjt, Rfcjt, Djt, R1jt, Hjt, Sjt, Njt, Wjt,
dmcjt, dmsjt, NC_stockjt, UC_stockjt;

DEVICE (PERIOD, P_RANGE, PROD_T, COMPONENT): diotnijt, reunijt, remnijt, recnijt,
wasnijt, fnijt, dv_comp1nijt, dv_comp2nijt, dv_comp3nijt, dv_comp4nijt;

COMPOSITION (COMPONENT, RAW_MAT) : njk, rnjk, cmjk;

ROUTE_MAT (PERIOD, RAW_MAT) : M1kt, M1Skt, RM1kt, RCM1kt, RPM1kt, NM1kt,
REM1kt, MC1kt, MC2kt, dmkt, RM_stockkt;

ENDSETS

DATA:

!Export des valeurs sur une feuille Excel;

```

profit = @OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx', 'TP');
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Rnt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Pnt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Unt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Qnt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Fnt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Knt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Znt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Vnt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = P_stocknt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = NP_stocknt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = rnit;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = diotnit;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = fnijt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Xjt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Yjt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Wjt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Hjt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Njt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Djt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx', "Runjt") = R1jt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Rfcjt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Sjt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Cjt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = Mjt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = UC_stockjt;

```

```

@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = NC_stockjt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = NM1kt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = M1kt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = RM1kt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = M1Skt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = REM1kt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = MC1kt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = MC2kt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = RCM1kt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = RPM1kt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = RM_stockkt;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = h4j;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Result_mf_FAIR_V2.xlsx') = h1n;
@OLE('C:\Users\AP80990\Desktop\Recup_TP.xlsx', 'ZA1') = profit;

```

!Variables;

!Rapport de vente;

rv = 0.6;

!Device of Internet of things;

diotnijt = @FILE('C:\Users\AP80990\Desktop\DIOT');

!Coût de fabrication de la composante j;

mj = 17.5 14 60.9 17.5 31.5 2.1 21 63 2.1 2.1;

!Coût de montage du produit n;

an = 2.2;

! Coût de démontage du produit n;

$dn = 2.2;$

!Coût d'élimination de la composante j;

$e_j = 0.6, 3, 1, 1.5, 2.0, 1.5, 0, 0, 0, 0;$

!Coût d'élimination du produit;

$eln = 4;$

!Prix de vente du produit avec des composants neufs uniquement;

$h_{2n} = 407;$

!Unités prix de vente de la pièce j neuve;

$h_{3j} = 20.8 \quad 16.7 \quad 72.5 \quad 20.8 \quad 37.5 \quad 2.5 \quad 25.0 \quad 75.0 \quad 2.5 \quad 2.5;$

!Nombre de composant j dans un produit n;

$c_{nj} = 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1 \quad 1;$

!Demande de produit n avec des composants neufs uniquement du centre S & C pendant la période t;

$d_{mnnt} = 150;$

!Demande de produit n du centre S & C pendant la période t;

$d_{mnt} = 100;$

!Demande du nouveau composant j du centre S & C pendant la période t;

$d_{msjt} = 10 \quad 10 \quad 10 \quad 10 \quad 10 \quad 10 \quad 10 \quad 10 \quad 10 \quad 10;$

!Demande du composant j usée du centre S & C pendant la période t;

$d_{mcjt} = 5 \quad 5 \quad 5 \quad 5 \quad 5 \quad 5 \quad 5 \quad 5 \quad 5 \quad 5;$

!Poids des composants;

```
weightnj = 0.075142161    0    0.258327    0.08245329    0.136880585    0.017465
0.095857    0.298944    0.017465    0.017465;
```

!Valeurs seuils;

ni1 = 0;

ni2 = 3;

nj1 = 0;

nj2 = 3;

nj3 = 8;

!Raw materials;

!Matériau k nécessaire pour le composant j;

```
njk =  0      0      0      0      0      0      0      0      0      15.7  0
0      0      4      0      0      0      0      0      0      0      0
0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
0      0      0      0      0      0      14.06  9.12  5.32  1      0      0
0      0      0      0      0      0      0      0.01355923  0.00477082
0.04770821  0.36576154  0.007158974  0.007515385  0.004510256
0.293846154  0.082669231  0      0      0      0      0      0      0      0
0      15      0      0      0      0      0.0038871  0.1878765  0
0.0058 0.01431718  0.00501834  0.05018342  0.39014564  0.007636239
0.00801641  0.00481094  0.313435897  0.088180513  1.6023 1.4597 0.773  0
0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0.0038871
0.1878765  1.1      0      0.01431718  0.00501834  0.05018342
0.39014564  0.007636239  0.00801641  0.00481094  0.313435897
0.088180513  0.80115      0.5065 0.5065 0      0      0      0      0      0
0      0      0      0      0      0.0038871  0.1878765  0.688  0      0
0      0      0      0      0      0      0      0      0      0      0
```

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0.01214654	0.00335269	0.03352692	0.21945692						
0.004295385	0.004509231	0.002706154	0.176307692	0.049601538	0.7672						
1.6843	1.3555	0.084	0	0	0	0	0	0	1.12294		
0.05	0.011	0.01	0.0038871	0.1878765	1.199	0		0.01934487			
0.011	0.11	0.06096026	0.001193162	0.001252564	0.000751709						
0.048974359	0.013778205	8.0115	8.4215	6.7775	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.0038871	0.1878765	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0.3	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0.373	0	0	0
0	0	0	0	0	0;						

!Part récupéré de matériau k sur le composant j;

rck =	0.9	0.95	0.75	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.85	0.95	
0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.9	0.95	0.15	0.95	0.05	0.05	
0.85	0.05	0.05	0.75	0.05	0.95;						

!Part récupéré de matériau k sur un produit;

rpk =	0.9	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.85	0.95	
0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.9	0.95	0.05	0.95	0.05	0.05	
0.95	0.05	0.05	0.65	0.75	0.95;						

!Prix de vente du matériau brut;

h4k =	0.008	31.240	0.245	0.003	1.046	0.001	0.136	0.005	0.091	0.001	
0.001	0.002	0.150	0.001	0.014	0.001	0.023	0.001	0.001	0.014	0.049	
25.220	0.000	0.069	0.008	0.000	0.057;						

!Prix de vente du matériau k recyclé depuis le composant j;


```
UC_stockinj = 0      0      0      0      0      0      0      0      0      0;
```

```
!Stock initial de produits avec des composants neufs uniquement;
```

```
NP_stockinn = 0;
```

```
!Stock initial de produits;
```

```
P_stockinn = 0;
```

```
!Stock initial de matière première;
```

```
RM_stockink = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,  
0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;
```

```
!Stock maximum de composants neufs;
```

```
NC_stockmaxj = 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200;
```

```
!Stock maximum de composants usés;
```

```
UC_stockmaxj = 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200 200;
```

```
!Stock maximum de produits avec des composants neufs uniquement;
```

```
NP_stockmaxn = 5;
```

```
!Stock maximum de produits;
```

```
P_stockmaxn = 200;
```

```
!Stock maximum de matières premières;
```

```
RM_stockmaxk = 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000  
100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000  
100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000 100000;
```

```
!Coût de stockage;
```



```

scpn = 0.0;
sccj = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;
scmk = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,
0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;

```

!Transport;

```

!Product;
g1n = 0;
g2n = 0;
g3n = 0;
g4n = 0;
g5n = 0;
g6n = 0;

```

```

!Components;
g7j = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;
g8j = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;
g9j = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;
g10j = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;
g11j = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;
g12j = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;
g13j = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;
g14j = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;
g15j = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;
g16j = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;
g17j = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;

```

!Raw materials;

$g18k = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,$
 $0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;$
 $g19k = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,$
 $0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;$
 $g20k = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,$
 $0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;$
 $g21k = 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0,$
 $0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;$

ENDDATA

@FOR(P_RANGE(N) : rpan(N) = @SUM(COMPONENT(J): cnnj(N,J) * mj(J));

!Coût de recovered;

@FOR(PRODUCT(T,N,I) :

$rnit(T,N,I) = @IF(diotnit\#GE\#ni2, rpan(N) * diotnit(T,N,I) / (10-ni2) -$
 $rpan(N)*ni2/(10-ni2),0));$

!Coût de remise à neuf de la composante j;

@FOR(DEVICE(T,N,I,J) : fnijt(T,N,I,J) = @IF((diotnijt\#GE\#nj2) #AND#
 (diotnijt\#LT\#nj3), $0.5*((0-mj(J))/(nj3-nj2)*diotnijt(T,N,I,J)+(mj(J)*nj3)/(nj3-$
 $nj2)),0));$

!Unités prix de vente de la pièce j usée;

@FOR(COMPONENT(J) : h4j(J) = rv * h3j(J));

!Prix de vente du produit remanufacturé;

@FOR(P_RANGE(N) : h1n(N) = rv * h2n(N)) ;

!Matériau nécessaire au remanufacturing des composants;

```
@FOR(COMPOSITION(J,K) : rnjk = 0 * njk);
```

```
!Matériau perdu dans les copeaux d'usinage des composants;
```

```
@FOR(COMPOSITION(J,K) : cmjk = 0 * njk);
```

```
!dioti;
```

```
@FOR(PRODUCT(T,N,I):
```

```
    diotnit(T,N,I) = @SUM(COMPONENT(J) : diotnijt(T,N,I,J) * weightnj(N,J));
```

```
!niveau de valeur du retour j;
```

```
@FOR(DEVICE(T,N,I,J):
```

```
    reunijt = @IF(diotnijt#LT#nj3, 0, dv_comp4nijt));
```

```
@FOR(DEVICE(T,N,I,J):
```

```
    remnijt = @IF(diotnijt#LT#nj2, 0, dv_comp3nijt));
```

```
@FOR(DEVICE(T,N,I,J):
```

```
    recnijt = @IF(diotnijt#LT#nj1, 0, dv_comp2nijt));
```

```
@FOR(DEVICE(T,N,I,J):
```

```
    wasnijt = dv_comp1nijt);
```

```
!niveau de valeur du retour i;
```

```
@FOR(PRODUCT(T,N,I):
```

```
    disnit = @IF(diotnit#LT#ni2, 0, dv_prod3nit));
```

```
@FOR(PRODUCT(T,N,I):
```

```
    recnit = @IF(diotnit#LT#ni1 ,0, dv_prod2nit));
```

```
@FOR(PRODUCT(T,N,I):
    wasnit = dv_prod1nit);
```

!Sélection;

```
@FOR(PRODUCT(T,N,I): useless1nit = @IF(diotnit#GE#ni2,1,0)*wasnit);
@FOR(PRODUCT(T,N,I): useless2nit = @IF(diotnit#GE#ni2,1,0)*recnit);
```

```
UselessCost = @SUM(PRODUCT(T,N,I): (useless1nit + useless2nit) * rnit);
Surplus = @SUM(PRODUCT(T,N,I) : @SUM(COMPOSITION(J,K) : useless2nit(N,I,T) *
h6k(K) * rpK(K) * njk(J,K) * cnnj(N,J)));
```

!Quantité de produits réparés envoyées du centre de réparation au centre de distribution pendant la période t;

```
@FOR(RANGE_DEM(T,N):
    Qnt(T,N) = @SUM(PROD_T(I) : disnit(T,N,I)));
```

!Total de produits recyclés pendant la période t;

```
@FOR(RANGE_DEM(T,N):
    Pnt(T,N) = @SUM(PROD_T(I) : recnit(T,N,I)));
```

!Total de produits jetés pendant la période t;

```
@FOR(RANGE_DEM(T,N):
    Unt(T,N) = @SUM(PROD_T(I) : wasnit(T,N,I)));
```

!Total de composants jetés après désassemblage;

```
@FOR(ROUTE(T,J):
Mjt(T,J) = @SUM(P_RANGE(N) : cnnj(N,J) * @SUM(PROD_T(I) : wasnijt(T,N,I,J) *
disnit(T,N,I)));
```

!Total de composants remis à neuf après désassemblage;

@FOR(ROUTE(T,J):

Rfcjt(T,J) = @SUM(P_RANGE(N) : cnnj(N,J) * @SUM(PROD_T(I) : remnijt(T,N,I,J) *
disnit(T,N,I))));

!Total de composants recyclés après désassemblage;

@FOR(ROUTE(T,J):

Cjt(T,J) = @SUM(P_RANGE(N) : cnnj(N,J) * @SUM(PROD_T(I) : recnijt(T,N,I,J) *
disnit(T,N,I))));

!Total de composants réutilisés;

@FOR(ROUTE(T,J):

R1jt(T,J) = @SUM(P_RANGE(N) : cnnj(N,J) * @SUM(PROD_T(I) : reunijt(T,N,I,J) *
disnit(T,N,I))));

!Fonction objectif;

!Total Revenu;

!Revenu des ventes de produits refabriqués;

TRSP = @SUM(RANGE_DEM(T,N): h1n(N) * Vnt(T,N));

!Revenu des ventes de produits neufs;

TRSNP = @SUM(RANGE_DEM(T,N): h2n(N) * Knt(T,N));

!Revenu des ventes des composants neufs;

TRNC = @SUM(ROUTE(T,J) : h3j(J) * Yjt(T,J));

!Revenu des ventes des composants refabriqués;

$$TRUC = @SUM(ROUTE(T,J) : h4j(J) * Sjt(T,J));$$

!Revenu grâce au recyclage des composants;

$$TRRC = @SUM(PERIOD(T) : @SUM(COMPOSITION(J,K) : Cjt(T,J) * h5k(K) * njk(J,K) * rck(K)));$$

!Revenu grâce au recyclage des produits;

$$TRRP = @SUM(PERIOD(T) : @SUM(COMPOSITION(J,K) : @SUM(P_RANGE(N) : Pnt(T,N) * h6k(K) * rpk(K) * njk(J,K) * cnnj(N,J))));$$

!Revenu grâce au recyclage des copeaux;

$$TRRMC = @SUM(ROUTE_MAT(T,K) : MC1kt(T,K) * h7k(K));$$

!Revenu grâce à la vente des matières premières;

$$TRSM = @SUM(ROUTE_MAT(T,K) : RM1kt(T,K) * h4k(K));$$

$$TR = TRSP + TRSNP + TRNC + TRUC + TRRC + TRRP + TRRMC + TRSM;$$

!Total Cost

!Coût total d'achat;

!Coût total d'achat de la matière première;

$$TPC1 = @SUM(ROUTE_MAT(T,K) : M1kt(T,K) * pmk(K));$$

!Coût total d'achat des produits récupérés;

$$TPC2 = @SUM(PRODUCT(T,N,I) : mit(T,N,I));$$

$$TPC = TPC1 + TPC2;$$

!Coût total de fabrication;

!Coût de manufacturing des composants;

$$TMC1 = @SUM(ROUTE(T,J) : Xjt(T,J) * mj(J));$$

!Coût d'assemblage des produits;

$$TMC2 = @SUM(RANGE_DEM(T,N) : an(N) * (Znt(T,N) + Fnt(T,N)));$$

!Coût de désassemblage des composants des produits réparés;

$$TMC3 = @SUM(RANGE_DEM(T,N) : dn(N) * Qnt(T,N));$$

!Coût de remanufacturing des composants;

$$TMC4 = @SUM(DEVICE(T,N,I,J) : fnijt(T,N,I,J));$$

$$TMC = TMC1 + TMC2 + TMC3 + TMC4;$$

!Coût d'élimination;

!Coût d'élimination des produits;

$$TDC1 = @SUM(RANGE_DEM(T,N) : Unt(T,N) * eln(N));$$

!Coût d'élimination des composants;

$$TDC2 = @SUM(ROUTE(T,J) : Mjt(T,J) * ej(J));$$

$$TDC = TDC1 + TDC2;$$

!Coût de transport;

!Coût de transport des produits;

$$\text{TTC1} = @SUM(\text{RANGE_DEM}(T,N) : g1n(N) * Znt(T,N) + g2n(N) * Vnt(T,N) + g3n(N) * Qnt(T,N) + g4n(N) * Unt(T,N) + g5n(N) * Fnt(T,N) + g6n(N) * Knt(T,N));$$

!Coût de transport des composants;

$$\begin{aligned} \text{TTC2} = @SUM(\text{ROUTE}(T,J) : & Xjt(T,J) * g7j(J) + Yjt(T,J) * g8j(J) + \\ & Hjt(T,J) * g9j(J) + Njt(T,J) * g10j(J) + Djt(T,J) * g11j(J) + Wjt(T,J) * g12j(J) \\ & + R1jt(T,J) * g13j(J) + Rfcjt(T,J) * g14j(J) + Cjt(T,J) * g15j(J) + Mjt(T,J) * g16j(J) + Sjt(T,J) \\ & * g17j(J)); \end{aligned}$$

!Coût de transport des matières premières;

$$\begin{aligned} \text{TTC3} = @SUM(\text{ROUTE_MAT}(T,K) : & RM1kt(T,K) * g18k(K) \\ & + M1Skt(T,K) * g19k(K) + REM1kt(T,K) * g20k(K) + MC1kt(T,K) * g21k(K)); \end{aligned}$$

$$\text{TTC} = \text{TTC1} + \text{TTC2} + \text{TTC3};$$

!Coût de stockage;

!Coût de stockage des produits;

$$\text{TSC1} = @SUM(\text{RANGE_DEM}(T,N) : (\text{P_stocknt}(T,N) + \text{NP_stocknt}(T,N)) * \text{scpn}(N));$$

!Coût de stockage des composants;

$$\text{TSC2} = @SUM(\text{ROUTE}(T,J) : (\text{UC_stockjt}(T,J) + \text{NC_stockjt}(T,J)) * \text{sccj}(J));$$

!Coût de stockage des matières premières;

$$\text{TSC3} = @SUM(\text{ROUTE_MAT}(T,K) : \text{RM_stockkt}(T,K) * \text{scmk}(K));$$

$$TSC = TSC1 + TSC2 + TSC3;$$

$$TC = TPC + TMC + TDC + TTC + TSC;$$

!Objectif;

$$TP = TR - TC - \text{Surplus} + \text{UselessCost};$$

$$MAX = TP;$$

!Constraints;

!Raw Materials

!Total de matières premières récupérées de composants;

@FOR(ROUTE_MAT(T,K):

$$RCM1kt(T,K) = @SUM(COMPONENT(J) : Cjt(T,J) * rck(K) * njk(J,K));$$

!Total de matières premières récupérées de produits;

@FOR(ROUTE_MAT(T,K):

$$RPM1kt(T,K) = @SUM(P_RANGE(N) : Pnt(T,N) * rpk(K) * @SUM(COMPONENT(J) : cnnj(N,J) * njk(J,K)));$$

!Conservation de la matiere premiere;

$$@FOR(ROUTE_MAT(T,K): M1kt = NM1kt + RCM1kt + RPM1kt + MC2kt);$$

!Matières premières nécessaires pour fabriquer les composants;

@FOR(ROUTE_MAT(T,K) :

$$M1Skt(T,K) - MC1kt(T,K) = @SUM(COMPONENT(J) : Xjt(T,J) * njk(J,K));$$

!Matière première nécessaire au remanufacturing;

@FOR(ROUTE_MAT(T,K) :

$$REM1kt(T,K) = 0);$$

!Matière première perdue dans l'usinage des composants;

@FOR(ROUTE_MAT(T,K) :

MC1kt(T,K) = 0);

!Matière première recyclé dans les copeaux d'usinage;

@FOR(ROUTE_MAT(T,K) :

MC2kt(T,K) = rcmk(K) * MC1kt(T,K));

!Respect de la demande en matière première;

@FOR(ROUTE_MAT(T,K) :

RM1kt(T,K) = 0);

!Products

!Respect de la demande en produit;

@FOR(RANGE_DEM(T,N) : Vnt(T,N) <= dmnt(T,N));

!Respect de la demande en produit composés de composants neufs uniquement;

@FOR(RANGE_DEM(T,N) : Knt(T,N) <= dmnnt(T,N));

!Components

!Les composants remanufacturés sont égaux en nombre à ceux revendus;

@FOR(ROUTE(T,J) : Rfcjt(T,J) - Djt(T,J) = 0);

!Nombre suffisant de composants pour fabriquer Fnt produits;

@FOR(ROUTE(T,J) : Wjt(T,J) - @SUM(P_RANGE(N) : cnnj(N,J) *
Fnt(T,N)) = 0);

!Nombre suffisant de composants pour fabriquer Znt produits;

@FOR(ROUTE(T,J) : Hj(t,T,J) + Njt(T,J) - @SUM(P_RANGE(N) : cnnj(N,J)
* Znt(T,N)) = 0);

!La demande en composants remanufacturés peut être compenser par des
composants neufs, la demande en composants neufs doit être satisfaites;

@FOR(ROUTE(T,J) : Sjt(T,J) <= dmcjt(T,J));

!La demande en composants neufs peut être compenser par des composants
neufs, la demande en composants neufs doit être satisfaites;

@FOR(ROUTE(T,J) : Yjt(T,J) <= dmsjt(T,J));

!Stock;

!Total des composants uses arrivants au stock à la période t;

@FOR(ROUTE(T,J):

UC_stockjt(T,J) = @IF((T-1 #EQ# 0), UC_stockinj(J) + Dj(t,T,J) - Njt(T,J) -
Sjt(T,J) + R1jt(T,J), UC_stockjt(T-1,J) + Dj(t,T,J) - Njt(T,J) - Sjt(T,J) + R1jt(T,J)));

!Total des composants neufs arrivants au stock à la période t;

@FOR(ROUTE(T,J):

NC_stockjt(T,J) = @IF(T-1 #EQ# 0, NC_stockinj(J) + Xjt(T,J) - Hj(t,T,J) - Wjt(T,J) -
Yjt(T,J), NC_stockjt(T-1,J) + Xjt(T,J) - Hj(t,T,J) - Wjt(T,J) - Yjt(T,J)));

!Total des produits arrivants au stock à la période t;

@FOR(RANGE_DEM(T,N):

P_stocknt(T,N) = @IF(T-1 #EQ# 0, P_stockinn(N) + Znt(T,N) - Vnt(T,N),
P_stocknt(T-1,N) + Znt(T,N) - Vnt(T,N)));

!Total des produits avec des composants neufs seulement arrivants au stock à la période

t;

@FOR(RANGE_DEM(T,N):

NP_stocknt(T,N) = @IF(T-1 #EQ# 0, NP_stockinn(N) + Fnt(T,N) - Knt(T,N),
NP_stocknt(T-1,N) + Fnt(T,N) - Knt(T,N));

!Total des matières premières arrivants au stock à la période t;

@FOR(ROUTE_MAT(T,K):

RM_stockkt(T,K) = @IF(T-1 #EQ# 0, RM_stockink(K) + M1kt(T,K) -
M1Skt(T,K) - RM1kt(T,K) - REM1kt(T,K), RM_stockkt(T-1,K) + M1kt(T,K) -
M1Skt(T,K) - RM1kt(T,K) - REM1kt(T,K));

!Le nombre de composants utilisés ne doit pas dépasser ce dont on dispose vraiment;

@FOR(ROUTE(T,J) : NC_stockjt(T,J) >= 0);

@FOR(ROUTE(T,J) : UC_stockjt(T,J) >= 0);

@FOR(ROUTE(T,J) : @GIN(NC_stockjt(T,J)));

@FOR(ROUTE(T,J) : @GIN(UC_stockjt(T,J)));

!Le nombre de produits utilisés ne doit pas dépasser ce dont on dispose vraiment;

@FOR(RANGE_DEM(T,N) : P_stocknt(T,N) >= 0);

@FOR(RANGE_DEM(T,N) : NP_stocknt(T,N) >= 0);

@FOR(RANGE_DEM(T,N) : @GIN(P_stocknt(T,N)));

@FOR(RANGE_DEM(T,N) : @GIN(NP_stocknt(T,N)));

!Le nombre de matières premières utilisées ne doit pas dépasser ce dont on dispose vraiment;

@FOR(ROUTE_MAT(T,K) : RM_stockkt(T,K) >= 0);

!Limites de stock;

@FOR(RANGE_DEM(T,N) : NP_stocknt(T,N) <= NP_stockmaxn(N));

@FOR(RANGE_DEM(T,N) : P_stocknt(T,N) <= P_stockmaxn(N));

```

@FOR(ROUTE(T,J) : NC_stockjt(T,J) <= NC_stockmaxj(J));
@FOR(ROUTE(T,J) : UC_stockjt(T,J) <= UC_stockmaxj(J));
@FOR(ROUTE_MAT(T,K) : RM_stockkt(T,K) <= RM_stockmaxk(K));

```

!Les composants et les produits sont entiers;

```

@FOR(ROUTE(T,J) : @GIN(Xjt(T,J)));
@FOR(ROUTE(T,J) : @GIN(Yjt(T,J)));
@FOR(ROUTE(T,J) : @GIN(Wjt(T,J)));
@FOR(ROUTE(T,J) : @GIN(Hjt(T,J)));
@FOR(ROUTE(T,J) : @GIN(Njt(T,J)));
@FOR(ROUTE(T,J) : @GIN(Djt(T,J)));
@FOR(ROUTE(T,J) : @GIN(R1jt(T,J)));
@FOR(ROUTE(T,J) : @GIN(Rfcjt(T,J)));
@FOR(ROUTE(T,J) : @GIN(Sjt(T,J)));
@FOR(ROUTE(T,J) : @GIN(Cjt(T,J)));
@FOR(ROUTE(T,J) : @GIN(Mjt(T,J)));
@FOR(RANGE_DEM(T,N) : @GIN(Rnt(T,N)));
@FOR(RANGE_DEM(T,N) : @GIN(Pnt(T,N)));
@FOR(RANGE_DEM(T,N) : @GIN(Unt(T,N)));
@FOR(RANGE_DEM(T,N) : @GIN(Qnt(T,N)));
@FOR(RANGE_DEM(T,N) : @GIN(Fnt(T,N)));
@FOR(RANGE_DEM(T,N) : @GIN(Znt(T,N)));
@FOR(RANGE_DEM(T,N) : @GIN(Vnt(T,N)));
@FOR(RANGE_DEM(T,N) : @GIN(Knt(T,N)));

```

!Les variables de décisions sont binaires;

```

@FOR(DEVICE : @BIN(dv_comp1nijt));
@FOR(DEVICE : @BIN(dv_comp2nijt));

```

```
@FOR(DVICE : @BIN(dv_comp3nijt));  
@FOR(DVICE : @BIN(dv_comp4nijt));  
@FOR(DVICE : dv_comp1nijt + dv_comp2nijt + dv_comp3nijt + dv_comp4nijt = 1);  
@FOR(PRODUCT : @BIN(dv_prod1nit));  
@FOR(PRODUCT : @BIN(dv_prod2nit));  
@FOR(PRODUCT : @BIN(dv_prod3nit));  
@FOR(PRODUCT : dv_prod1nit + dv_prod2nit + dv_prod3nit = 1);
```

```
END
```

ANNEXE II

DONNÉES NUMÉRIQUES POUR L'ÉTUDE DE CAS (1)

Quantity of raw material k (Geldron) in each component j ($n_{j,k}$), proportion of raw material k recovered from the recycling of a component (rc_k) and a product (rp_k), purchase price (in €/g) of raw material k (pm_k), transportation costs (in €/g) of material k ($h5_k \dots h7_k$)
(cont'd)

		k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8	k=9
n_{j,k}	j=1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	j=2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	j=3	0.0136	0.0048	0.0477	0.3658	0.0072	0.0075	0.0045	0.2938	0.0827
	j=4	0.0143	0.0050	0.0502	0.3901	0.0076	0.0080	0.0048	0.3134	0.0882
	j=5	0.0143	0.0050	0.0502	0.3901	0.0076	0.0080	0.0048	0.3134	0.0882
	j=6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	j=7	0.0121	0.0034	0.0335	0.2195	0.0043	0.0045	0.0027	0.1763	0.0496
	j=8	0.0193	0.0110	0.1100	0.0610	0.0012	0.0013	0.0008	0.0490	0.0138
	j=9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	j=10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	rc_k	0.9	0.95	0.75	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.85
	rp_k	0.9	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.85
	pm_k	1.5E-02	6.2E+01	4.9E-01	5.3E-03	2.1E+00	2.3E-03	2.7E-01	9.1E-03	1.8E-01
	h5_k ... h7_k	0.008	31.240	0.245	0.003	1.046	0.001	0.136	0.005	0.091

ANNEXE III

DONNÉES NUMÉRIQUES POUR L'ÉTUDE DE CAS (2)

Quantity of raw material k (Geldron) in each component j ($n_{j,k}$), proportion of raw material k recovered from the recycling of a component (rc_k) and a product (rp_k), purchase price (in €/g) of raw material k (pm_k), transportation costs (in €/g) of material k ($h5_k \dots h7_k$)
(cont'd)

		k=10	k=11	k=12	k=13	k=14	k=15	k=16	k=17	k=18
nj,k	j=1	15.700	0.000	0.000	0.000	4.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	j=2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	14.060	9.120	5.320	1.000
	j=3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	j=4	1.602	1.460	0.773	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	j=5	0.801	0.507	0.507	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	j=6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	j=7	0.767	1.684	1.356	0.084	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	j=8	8.012	8.422	6.778	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	j=9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.300
	j=10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.373
	rck	0.95	0.9	0.95	0.15	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
	rp _k	0.95	0.9	0.95	0.05	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
	pm _k	2.7E-03	2.0E-03	3.0E-03	3.0E-01	2.7E-03	2.7E-02	2.3E-03	4.5E-02	1.6E-03
	h5 _k ... h7 _k	0.001	0.001	0.002	0.150	0.001	0.014	0.001	0.023	0.001

ANNEXE IV

DONNÉES NUMÉRIQUES POUR L'ÉTUDE DE CAS (2)

Quantity of raw material k (Geldron) in each component j ($n_{j,k}$), proportion of raw material k recovered from the recycling of a component (rc_k) and a product (rp_k), purchase price (in €/g) of raw material k (pm_k), transportation costs (in €/g) of material k ($h5_k \dots h7_k$)
(cont'd)

		k=19	k=20	k=21	k=22	k=23	k=24	k=25	k=26	k=27
$n_{j,k}$	j=1	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	j=2	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	j=3	15.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1879	0.0000	0.0000	0.0058
	j=4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0039	0.0000	1.1000	0.0000
	j=5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0039	0.0000	0.6880	0.0000
	j=6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000
	j=7	0.0000	1.1229	0.0500	0.0110	0.0100	0.0039	0.0000	1.1990	0.0000
	j=8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0039	0.0000	0.0000	0.0000
	j=9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	j=10	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	rc _k	0.9500	0.0500	0.0500	0.8500	0.0500	0.0500	0.7500	0.0500	0.9500
	rp _k	0.9500	0.0500	0.0500	0.9500	0.0500	0.0500	0.6500	0.7500	0.9500
	pm _k	1.4E-03	2.7E-02	9.8E-02	5.0E+01	1.2E-04	1.4E-01	1.5E-02	7.0E-04	1.1E-01
	h5 _k ... h7 _k	0.001	0.014	0.049	25.220	0.000	0.069	0.008	0.000	0.057

APPENDICE I

PREUVE DE SOUMISSION DE L'ARTICLE DE REVUE

From: <cmj@lepro.175f6cf5f733c5674@editorialmanager.com> on behalf of Yutao Wang
<cmj@editorialmanager.com>
Sent: Friday, July 31, 2020, 11:52 AM
To: Lucas Abis-Hof
Subject: Editor handles ICIEPRO D 20 15899

Ms. Ref. No: JCLEPRO-D-20-15899 Title: Circular Manufacturing 4.0: towards Internet of Things embedded Closed-Loop Supply Chains Journal of Cleaner Production Dear Dr. Lucas Abia Iñot, Your submission entitled "Circular Manufacturing 4.0: towards Internet of Things embedded Closed-Loop Supply Chains" will be handled by Co-Editor-in-Chief Yutao Wang, Ph.D. You may check on the progress of your paper by logging on to the Editorial Manager as an author. The URL is <https://www.editorialmanager.com/jclepro/>. Your username is: lucashof
<https://www.editorialmanager.com/jclepro/asp?i=3205995&tl=4628GHM0> Thank you for submitting your work to this journal. Kind regards, Editorial Manager Journal of Cleaner Production For further assistance, please visit our customer support site at <http://help.ebsci.com/app/answers/list/p/7923>. Here you can search for solutions on a range of topics, find answers to frequently asked questions and learn more about EM via interactive tutorials. You will also find our 24/7 support contact details should you need any further assistance from one of our customer support representatives.

_____ In compliance with data protection regulations, you may request that we remove your personal registration details at any time. [Use the following URL: <https://www.editorialmanager.com/jclepro/login.asp?a=0>]. Please contact the publication office if you have any questions.

APPENDICE II

ARTICLE DE CONFÉRENCE

Article de conférence « 8th International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain: Interconnected Supply Chains in an Era of Innovation (ILS 2020)

April 22-24, 2020, Austin, Texas, US ».

Publié dans «Proceedings of the eight International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain (ILS 2020) », p220-227.



ILS 2020
INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION
SYSTEMS, LOGISTICS & SUPPLY CHAIN
Austin, Texas April 22-24, 2020

Closed loop supply chain optimization for Circular Manufacturing using Industry 4.0 technologies

Delpla Victor, Hof Lucas A., Kenné Jean-Pierre

Ecole de Technologie Supérieure, Montréal, Canada
{victor.delpla.1@ens.etsmtl.ca.com, lucas.hof@etsmtl.ca, jean-pierre.kenne@etsmtl.ca}

Abstract. Closed-Loop Supply Chains (CLSC) fit into the logic of the circular economy aiming to limit the unsustainable use of non-renewable resources. Circular manufacturing refers to the circular economy applied to manufacturing industry. Industry 4.0 introduces new tools such as the Internet of Things (IoT) to optimize CLSC's performance in this circular manufacturing context. This study proposes a CLSC model that meets the sales and collection center (S&C) demands and maximizes total profit by indicating processing to be applied to the End-of-Life (EOL) products collected. This processing is chosen according to the product or component condition which is estimated by data collected during the product's life cycle using sensors and RFID. To solve the proposed CLSC model, linear physical programming is used.

Keywords: “Close Loop Supply Chain”, “Internet of Things”, “Remanufacturing”, “RFID”, “Industry 4.0”

1. Introduction

Industry 4.0 is characterized by the intelligent automation and digitization of production, management and decision-making systems in manufacturing companies. Its objective is to improve the productivity and flexibility of the manufacturing sector. In view of increased economic competition in the world and the growing importance of environmental issues, recycling and remanufacturing are becoming essential activities for industry to develop. Circular manufacturing is a model where limited resources are used sustainably, and products are designed to reduce losses (Van den Berg et Bakker, 2015). The main objective of supply chains is to provide products to customers in time and in the condition expected. It is therefore necessary to have complete visibility of the products during their manufacture, use and recovery. The processing of EOL products in a CLSC can be determine with integrated sensors (Ondemir et al., 2012). Recycling, as the recovery of raw material, and disposal were the main processing for EOL products, but with technological advances such as additive manufacturing or high-precision machining, remanufacturing is now a possible processing option. Estimating the remanufacturability of a product at the end of its life is crucial to determine its processing after recovery. Its ecological impact and the profit generated by remanufacturing can be examined (Yang et al., 2014). For instance, it is thus more profitable, under certain conditions, to repair a turbine blade by additive manufacturing than to manufacture a new one (Wilson et al., 2014). If a product or component is in too unsatisfactory a condition to be repaired, recycling is an economically and ecologically viable solution. For example, the way a product is disassembled before being recycled changes the amount of raw materials recovered (Reuter et al., 2018). In the context of the circular economy, it is important to develop CLSC that consider reuse, remanufacturing and recycling. IoT can be implemented on products with sensors and RFID tags to determine the remaining service life of the products. Optimizing the planning of remanufacturing, disassembly, recycling and disposal of these products is then perfected (Ondemir et Gupta, 2014). Linear physical programming models take up this planning optimization by maximizing total profit and quality. The conception of a product is essential to satisfy the demands for products, components and raw materials (Joshi et Gupta, 2019). CLSC models consider the remanufacturing and elimination of a single modular product and its components. The processing followed by the recovered products and components

depends on their conditions which are evaluated by a number. This number is determined by sensors collecting data, like various usage parameters, and stored on an RFID tag on the product. This installation is called Device of Internet of Things (DIOT). The synthetic number is also called DIOT. An example of current CLSC models using DIOT is shown in Figure 1 (Paksoy et al., 2016). The objective of this study is to: 1) improve the current DIOT based CLSC model (Figure 1) to better approach industrial reality, in particular, raw materials and stocks will be considered in the supply chain, and 2) to determine the processing choice of a product and its components to optimize the total profit of the manufacturer by using the IoT and the information collected on the components during their manufacture and use. This information enables an effective evaluation of the product and components condition, including their remanufacturability. We first set the objectives of the model and the assumptions chosen. We then identify the parameters and variables of the model, its objective function and its constraints. Finally, we test the model with a digital example with a modular smartphone range.

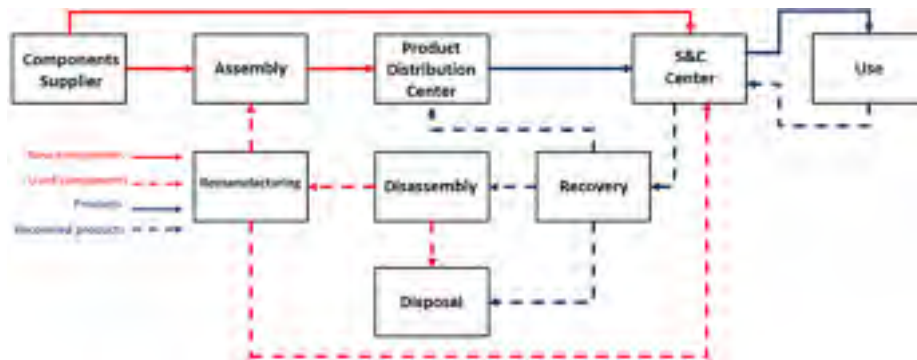


Figure 1: CLSC model already existing in the literature.

2. Problem statement

This study focuses on a product and component manufacturer who wants to satisfy the demands of a sales and collection center (S&C center). The manufacturer produces a range of N different products composed of J separate components. An amount of K raw materials is used for all components. The components of a product have a weight importance of 0 to 1 and

their sum is equal to 1. It recovers during each of the T periods up to I units of the products. The manufacturer is supplied with raw material from an external supplier and can also sell unprocessed raw material. The CLSC on which the problem is based is presented in Figure 2. This model, with stocks and raw materials, more accurately reflects the industrial reality. This manufacturer includes several stocks and workshops framed in Figure 2. This model also considers multiple products and not a single product as in the existing models. EOL products collected by the S&C center are purchased at a price corresponding to their value level. In this study, there are three recovery options for products: disassembly, recycling and disposal. In the disassembly option, components can undergo four processing: reuse, remanufacturing, recycling or disposal. Products, components and raw materials are sold or stored to meet the S&C demands.

The model aims to answer the following questions:

- 1) What recovery options should be selected for returned products (disassembled, recycled or eliminated) and components (reused, remanufactured, recycled or disposed of) for each period?
- 2) What products, components or raw materials should be sold to meet the demands for each period?
- 3) How many raw materials should be obtained from external suppliers for each period?

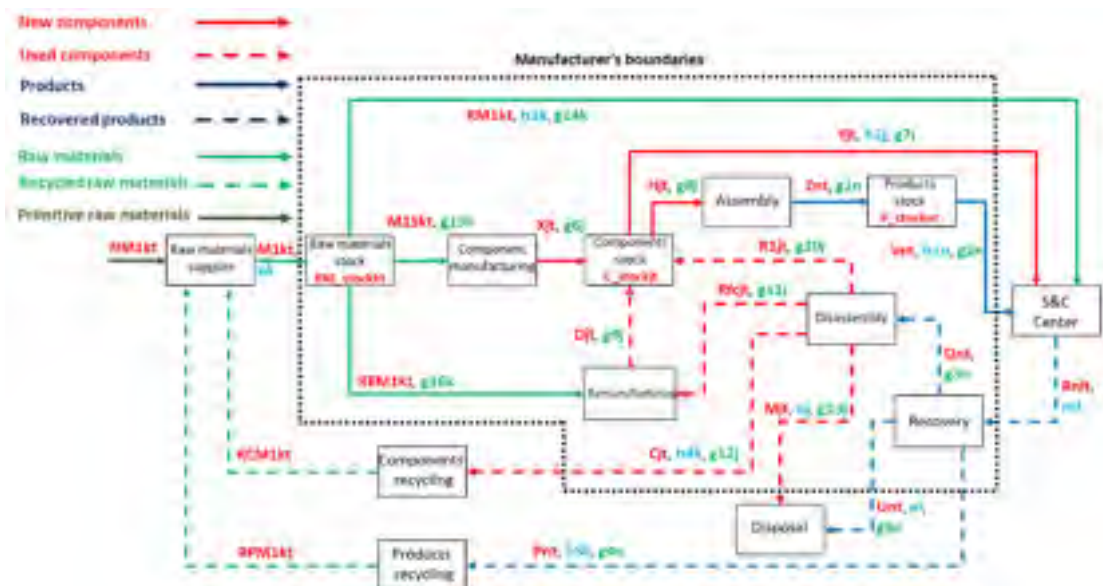


Figure 2: CLSC model developed in the study.

The assumptions of the problem are:

- A component can be used for different products.
- There is no difference between a product composed of new or used components.
- Primitive raw materials and recycled raw materials are considered to be identical.
- Production capacity is sufficient.
- All information on sales, transport and storage costs and prices is known.
- The demand of the S&C center is given and satisfied for each period.

3. Mathematical model

The model calculates the flows of several totally modular products, components and raw materials to maximize total profit and meet demands. The running number indices, parameters and decision variables are given in Table 1, 2 and 3.

Table 1: Running numbers.

<i>t</i>	Time periods	$(t = 1, \dots, T)$
<i>n</i>	Fully modular products	$(n = 1, \dots, N)$
<i>i</i>	Returned products	$(i = 1, \dots, I)$
<i>j</i>	Components usable for each product	$(j = 1, \dots, J)$
<i>k</i>	Raw materials	$(k = 1, \dots, K)$

Table 2: Parameters

Parameters	Description	Parameters	Description
ef_n	Disposal cost of a product n	$h2_j$	Sales price of a new component j
$rc_{n,i}$	Number of components j in a product n	$dmc_{j,t}$	Component j demand of the SAC center in period t
$weight_j$	Component j importance weight	$g6_j - g13_j$	Transportation cost of new component j
$r_{n,i}$	Purchasing cost of a i -level product n from the SAC center	sc_j	Component j storage cost
$R_{n,i,t}$	Number of used product n in the i -level are purchased from the SAC center in period t	$C_stock_{n,j}$	Initial component j stock
$h1_n$	Sales price of a product n	$C_stockmax_j$	Maximal component j stock
$dm_{n,t}$	Product n demand of the SAC center in period t	$dior_{n,i,t}$	DIOT of component j recovered in period t
$g1_n - g5_n$	Transportation cost of product n	n_{j1}, n_{j2}, n_{j3}	Threshold value of $dior_{n,i,t}$
sc_n	Product n storage cost	rp_k	Recovery part of raw material k on product n
$P_stock_{n,i}$	Initial product n stock	$rc_{j,k}$	Recovery part of raw material k on component j
$P_stockmax_n$	Maximal product n stock	p_k	Purchasing cost of raw material k from the raw materials supplier
$dior_{n,i,t}$	DIOT of the i product n recovered in period t	$h3_k$	Sales price of raw material k for the SAC center
n_{j1}, n_{j2}	Threshold value of $dior_{n,i,t}$	$h4_k$	Sales price of raw material k recycled from components
a_j	Assembly cost of component j	$h5_k$	Sales price of raw material k recycled from products
d_j	Dismantling cost of component j	$dm_{k,t}$	Raw material k demand of the SAC center in period t
e_j	Elimination cost of component j	$g14_k - g16_k$	Transportation cost of raw material k between the stock and the SAC center
f_j	Repair cost of component j	sc_k	Raw material k storage cost
m_j	Manufacturing cost of component j	$RM_stock_{n,k}$	Initial raw material k stock
$n_{j,k}$	Number of raw materials k in a component j	$RM_stockmax_k$	Maximal raw material k stock
$rm_{j,k}$	Number of raw materials k to manufacture a component j		

Table 3: Decisions variables.

Decisions variables	Description	Decisions variables	Description
$Z_{n,t}$	Number of products n sent to the stock in period t	$Rfc_{j,t}$	Number of components j remanufactured in period t
$V_{n,t}$	Number of products n sold to the SAC center in period t	$R1_{j,t}$	Number of components j reused in period t
$Q_{n,t}$	Number of products n disassembled in period t	$M_{j,t}$	Number of components j assembled in period t
$U_{n,t}$	Number of products n eliminated in period t	$C_stock_{j,t}$	Number of components j in stock in period t
$P_{n,t}$	Number of products n recycled in period t	$NM1_{k,t}$	Number of primitive raw material k entering in the supply chain in the period t
$P_stock_{n,t}$	Number of products n in stock in period t	$M1_{k,t}$	Number of raw material k purchased in the period t
$X_{j,t}$	Number of components j manufactured in period t	$RCM1_{k,t}$	Number of raw material k recycled from components in period t
$Y_{j,t}$	Number of components j sold to SAC center in period t	$RPM1_{k,t}$	Number of raw material k recycled from products in period t
$H_{j,t}$	Number of new components j sent to assembly in period t	$RM1_{k,t}$	Number of raw material k sold to SAC center in period t
$D_{j,t}$	Number of components j sent to the stock in period t	$REM1_{k,t}$	Number of raw material k sent to remanufacturing in period t
$C_{j,t}$	Number of components j in stock in period t	$RM_stock_{k,t}$	Number of raw material k in stock in period t

The DIOT concept is used to determine the component value level. Threshold values are defined for components to decide on the value level and the processing used. In this study, the component DIOT is defined in Figure 3.

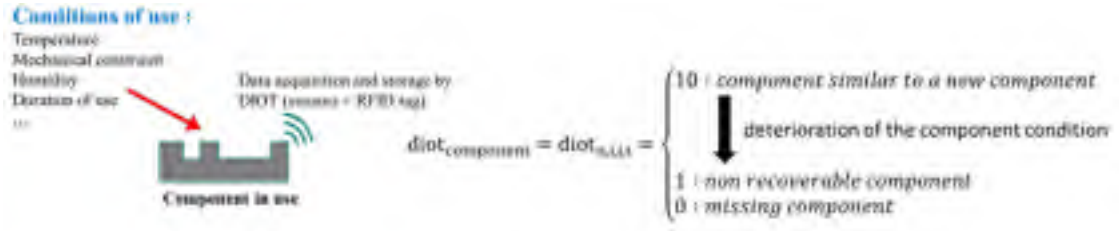


Figure 3: Component DIOT definition

Condition of a recovered product is defined by a product DIOT which is calculated according to the $diot_{component}$ of each of its components and the importance of each component. We define $diot_{product}$ as follows:

$$diot_{product} = diot_{n,i,t} = \sum_j weight_j \cdot diot_{n,i,j,t}. \quad (1)$$

Binary variables are defined to indicate the chosen processing for products.

$$was_{n,i,t} = \begin{cases} 1 & \text{if } 0 < diot_{n,i,t} < n_{i1} \text{ (eliminated)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (2)$$

$$rec_{n,i,t} = \begin{cases} 1 & \text{if } n_{i1} \leq diot_{n,i,t} < n_{i2} \text{ (recycled)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (3)$$

$$dis_{n,i,t} = \begin{cases} 1 & \text{if } n_{i2} \leq diot_{n,i,t} \text{ (disassembly)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (4)$$

Similarly, binary variables are defined to indicate the chosen processing for components.

$$was_{n,i,j,t} = \begin{cases} 1 & \text{if } 1 \leq diot_{n,i,j,t} < n_{j1} \text{ (eliminated)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (5)$$

$$rec_{n,i,j,t} = \begin{cases} 1 & \text{if } n_{j1} \leq diot_{n,i,j,t} < n_{j2} \text{ (recycled)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (6)$$

$$\text{rem}_{n,i,j,t} = \begin{cases} 1 & \text{if } n_{j2} \leq \text{diot}_{n,i,j,t} < n_{j3} \text{ (remanufactured)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (7)$$

$$\text{reu}_{n,i,j,t} = \begin{cases} 1 & \text{if } n_{j3} \leq \text{diot}_{n,i,j,t} \text{ (reused)} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (8)$$

3.1. Objective function

The economic aspect is the only aspect that is considered. The objective function is to maximize the total profit of the manufacturer. Total profit (TP) is calculated by the difference between total revenue (TR) and total cost (TC):

$$\text{TP} = \text{TR} - \text{TC}. \quad (9)$$

Total revenue (TR) of the manufacturer is earned from the sales of products, components and raw materials and equal:

$$\begin{aligned} \text{TR} = \sum_t [& \sum_n h1_n \cdot V_{n,t} + \sum_j h2_j \cdot Y_{j,t} + \sum_k h3_k \cdot \text{RM1}_{k,t} + \\ & \sum_j \sum_k (C_{j,t} \cdot h4_k \cdot n_{j,k} \cdot rc_{j,k} + P_t \cdot rc_{n,j} \cdot h5_k \cdot n_{j,k} \cdot rp_k)]. \end{aligned} \quad (10)$$

The manufacturer purchases raw materials and products recovered by the S&C center. The total purchase cost (TPC) is calculated as follows:

$$\text{TPC} = \sum_t [\sum_k p_k \cdot M1_{k,t} + \sum_n \sum_l r_{n,l} \cdot R_{n,l,t}]. \quad (11)$$

Different operations on products and components have costs, this is the total manufacturing cost (TMC). The manufacturer produces new components, assembles products, disassembles end-of-life products and remanufactures used components. TMC is equal to:

$$TMC = \sum_t \sum_j [m_j \cdot X_{j,t} + d_j \cdot (R1_{j,t} + Rfc_{j,t} + C_{j,t} + M_{j,t}) + f_j \cdot Rfc_{j,t} + a_j \cdot H_{j,t}]. \quad (12)$$

The manufacturer also eliminates products and components. The total disposal cost (TDC) is:

$$TDC = \sum_t [\sum_n el_n \cdot U_{n,t} + \sum_j e_j \cdot M_{j,t}]. \quad (13)$$

The total cost of transport (TTC) and the total cost of storage (TSC) of products, components and raw materials can be calculated with the different parameters and variables.

The total cost (TC) of the manufacturer can then be calculated:

$$TC = TPC + TMC + TDC + TTC + TSC. \quad (14)$$

3.2. Constraints

The amount in stocks (products, new components, used components, raw materials) in period t are equal to the amount in stocks in the previous period, plus entering flows, minus outgoing flows:

$$stock_t = stock_{t-1} + \text{entering flows} - \text{outgoing flows}, \forall t. \quad (15)$$

For any period t , the amount of components j disassembled and then disposed of, recycled, repaired or reused must be equal to the number of components present in the products sent for disassembly:

$$Rfc_{j,t} + M_{j,t} + C_{j,t} + R1_{j,t} = \sum_n Q_{n,t} \cdot rc_{n,j}, \forall (t, n). \quad (16)$$

For any period t , the amount of components j present in the assembled products must be equal to the amount that arrives at the assembly:

$$H_{j,t} = \sum_n Z_{n,t} \cdot rc_{n,j}, \forall(t, n). \quad (17)$$

For any period t , the amount of raw material k recovered from components and products recycling is respectively calculated as follows:

$$RCM1_{k,t} = \sum_j C_{j,t} \cdot rc_{j,k} \cdot n_{j,k}, \forall(t, k). \quad (18)$$

$$RPM1_{k,t} = rp_k \cdot \sum_n P_{n,t} \cdot \sum_j rc_{n,j} \cdot n_{j,k}, \forall(t, k). \quad (19)$$

For any period t , the amount of raw material k required to manufacture the components that will be sent to the stock of new components is calculated as follows:

$$M1S_{k,t} = \sum_j X_{j,t} \cdot n_{j,k}, \forall(t, k). \quad (20)$$

For any period t , the amount of raw material k required for the repair the recovered components is calculated as follows:

$$REM1_{k,t} = \sum_j Rfc_{j,t} \cdot rn_{j,k}, \forall(t, k). \quad (21)$$

4. Numerical example

We consider the recovery of two smartphone models ($N=2$) over two periods ($T=2$). During each period, 8 smartphones are retrieved from each model ($I=8$). Components and raw materials compositions are given in Figure 4 ($J=6, K=7$). All variables and parameters in Table 2 are known in the example. This mathematical model was solved using LINGO 16.0.



Figure 4: Smartphones studied in the example.

In this example, the maximum total profit over the 2 periods is 191.998: the total revenue is 4345.62 and the total cost is 4153.622. The summary of costs and revenue is given in Table 4.

Table 4: The optimal objective function value.

Objective Function	Value
TR	4345.62
TPC	2538.55
TMC	1175.4
TDC	24.2
TTC	414.12
TSC	1.352
TC	4153.622
TP	191.998

In the first period, the flows of products, components and raw materials to maximize total profit are given in Figure 5. We can note the conservation of all the material.

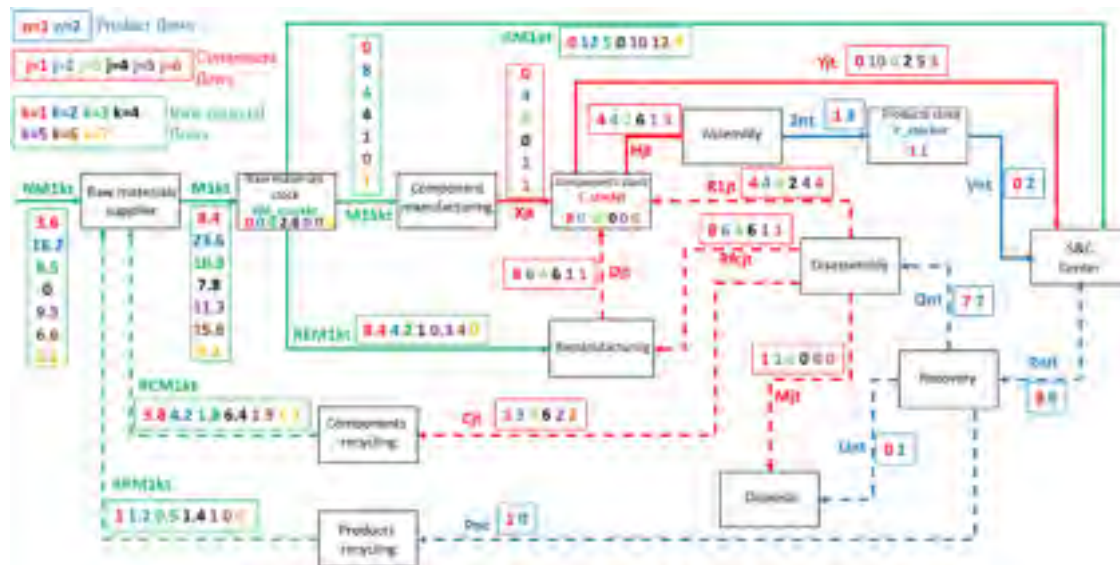


Figure 5: The optimal distribution networks belonging to the first period.

The details of the processing applied to the products recovered during the first period depend on the DIOT values and the threshold values given in Figure 6.

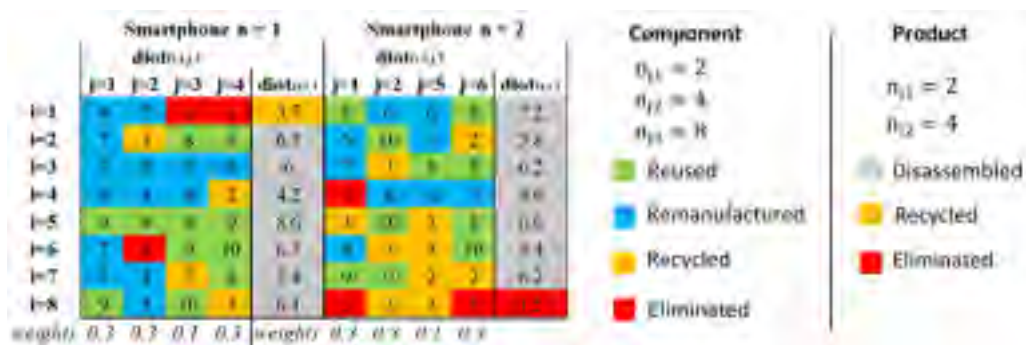


Figure 6: Processing details in the first period

In this example, all recovered smartphones are disassembled as shown in Figure 6; except the smartphone ($n=1, i=1$) which is recycled before disassembly and the smartphone ($n=2, i=8$) which is eliminated. The model meets the objectives as formulated in section 2 (problem statement). Recovery processing of products and components is selected according to their recovery state for each period in order to maximize profit. The flows of products, components

and raw materials in the CLSC are precisely known. These flows meet the S&C center's demands for each period. Finally, the model estimates the impact on natural resources by indicating the quantity of raw materials that enter the supply chain.

5. Conclusion

Manufacturers aim to improve their supply chain to increase their profits while being more respectful of the environment. It becomes necessary to design CLSCs, but these networks are difficult to set up because there are many uncertainties in the recovery of products and the optimal process to follow. IoT reduces this uncertainty by providing information collected during the product life cycle. In this study, connected products provide better traceability to choose the recovery process and optimize flows in the CLSC. Thus, with the example developed in section 4, the flows to optimize profit were determined and the processing of each recovered smartphone and their components were identified. The proposed model is more in accordance with the industrial reality with stocks, raw materials and several different products than the current models. Future research to complement this study will focus on determining how to measure DIOTs for examples of products and we will examine the sensitivity of the model to variation of some parameters.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME. (2010). La Responsabilité élargie du Producteur - Panorama 2010. du volume): *Vol. 1* (pp. 28).
- ADEME. (2014). *Chiffres-clés des Déchets - Édition 2014*
- ADEME. (2016). *Chiffres-clés Déchets - Édition 2016* Repéré à <http://www.ademe.fr/dechets-chiffres-cles>
- ADEME. (2017). *Rapport annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques - Rapport Annuel 2016*.
- Allwood, J. M. (2014). Chapter 30 - Squaring the Circular Economy: The Role of Recycling within a Hierarchy of Material Management Strategies. Dans E. Worrell & M. A. Reuter (Éds.), *Handbook of Recycling* (pp. 445-477). Boston: Elsevier. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396459-5.00030-1>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123964595000301>
- Arnold, G. A. (1921). The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 221, 163–198. doi: <http://doi.org/10.1098/rsta.1921.0006>
- Arnsperger, C., & Bourg, D. (2016). Vers une économie authentiquement circulaire. Réflexions sur les fondements d'un indicateur de circularité [Towards a truly circular economy]. *Revue de l'OFCE*, 145(1), 91-125. doi: 10.3917/reof.145.0091. Repéré à <https://www.cairn.info/revue-de-l-ofce-2016-1-page-91.htm>
- Asif, F. M. A. (2017). *Circular Manufacturing Systems: A development framework with analysis methods and tools for implementation* (KTH Royal Institute of Technology).
- Bahrampour, P., Safari, M., & Taraghdari, M. B. (2016). Modeling Multi-Product Multi-Stage Supply Chain Network Design. *Procedia Economics and Finance*, 36, 70-80. doi: [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(16\)30017-X](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(16)30017-X). Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221256711630017X>
- Bakker, v. d. B. a. (2015). A product design framework for a circular economy.
- Beal, L., Hill, D., Martin, R., & Hedengren, J. (2018). GEKKO Optimization Suite. *Processes*, 6(8). doi: 10.3390/pr6080106
- Béguin, M. (2016). Pratiques et territoires de l'écoresponsabilité : des questions de gouvernance, de culture, de société et de recherche. *Communication et organisation*, 45-60. doi: <https://doi.org/10.4000/communicationorganisation.5340>

- Bharath, A., & Petrou, M. (2009). *Next generation artificial vision systems: reverse engineering the human visual system*.
- Blomsma, F., Pieroni, M., Kravchenko, M., Pigosso, D. C. A., Hildenbrand, J., Kristinsdottir, A. R., . . . McAloone, T. C. (2019). Developing a circular strategies framework for manufacturing companies to support circular economy-oriented innovation. *Journal of Cleaner Production*, 241. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118271
- Bocken, N. M. P., Miller, K., Weissbrod, I., Holgado, M., & Evans, S. (2017). Business model experimentation for circularity: Driving sustainability in a large international clothing retailer. *ECONOMICS AND POLICY OF ENERGY AND THE ENVIRONMENT*, 85-122.
- Bressanelli, G., Perona, M., & Saccani, N. (2018). Challenges in supply chain redesign for the Circular Economy: a literature review and a multiple case study. *International Journal of Production Research*, 57, 7395-7422. doi: 10.1080/00207543.2018.1542176
- Brettel, M., Klein, M., & Friederichsen, N. (2016). The Relevance of Manufacturing Flexibility in the Context of Industrie 4.0. *Procedia CIRP*, 41, 105-110. doi: 10.1016/j.procir.2015.12.047
- Brundtland, G. H. (1987). Our Common Future—Call for Action. *Environmental Conservation*, 14(4), 291-294. Repéré à <http://www.jstor.org/stable/44518052>
- Bryan, N., & Srinivasan, M. M. (2014). Real-time order tracking for supply systems with multiple transportation stages. *European Journal of Operational Research*, 236(2), 548-560. doi: 10.1016/j.ejor.2014.01.062
- Marquet C., Monier V., Imperiale A.-C., Maccario F., Basciano R., Beuret P., Kuch P., Jayr E. (2017). *Panorama de la deuxième vie des produits en France – Réemploi et réutilisation - Actualisation 2017*. ADEME.
- Camara, L. (2019). *Planification tactique-opérationnelle des chaînes d'approvisionnement durables en boucle fermée (logistique inverse)* (École de technologie supérieure., Montréal).
- Cannella, S., Bruccoleri, M., & Framinan, J. M. (2016). Closed-loop supply chains: What reverse logistics factors influence performance? *International Journal of Production Economics*, 175, 35-49. doi: 10.1016/j.ijpe.2016.01.012
- Cantamessa, M., & Capello, C. (2009). Flexibility in Manufacturing – An Empirical Case-Study Research. Dans T. Tolio (Éd.), *Design of Flexible Production Systems: Methodologies and Tools* (pp. 19-40). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

doi: 10.1007/978-3-540-85414-2_2. Repéré à https://doi.org/10.1007/978-3-540-85414-2_2

- Chardine-Baumann, E., & Botta-Genoulaz, V. (2014). A framework for sustainable performance assessment of supply chain management practices. *Computers & Industrial Engineering*, 76, 138-147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.07.029>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036083521400237X>
- Chari, N., Dialo, C., & Venkatadri, U. (2014). State of the Art on Performability across the Sustainable Value Chain. *International Journal of Performability Engineering*, Vol. 10, 543-556.
- Chouinard, M. (2003). *Système organisationnel et architecture d'un support d'information pour l'intégration des activités de logistique inversée au sein d'un centre de réadaptation* (Université Laval Québec).
- Combe, H. (2015). La gouvernance, une impérieuse nécessité pour le développement durable. *Développement durable et territoires*, 6. doi: <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.10852>
- Corning. (2020). CORNING® GORILLA® GLASS 6 Repéré le 10/10/2020 à <https://www.corning.com/gorillaglass/worldwide/en/glass-types/gorilla-glass-6.html>
- Dalenogare, L., Benitez, G., Ayala, N., & Frank, A. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*. doi: 10.1016/j.ijpe.2018.08.019
- Deloitte. (2015). *Industry 4.0 : Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies*. Deloitte.
- Demetriou, G. A. (2011). *Mobile robotics in education and research, mobile robots: Current trends*.
- Devy, M. (2012). La cobotique : des robots industriels aux robots assistants, coopérants et co-opérateurs. *Annales des Mines - Réalités industrielles*, Février 2012(1), 76-85. doi: 10.3917/rindu.121.0076. Repéré à <https://www.cairn.info/revue-realites-industrielles1-2012-1-page-76.htm>
- Du, Y., Cao, H., Chen, X., & Wang, B. (2013). Reuse-oriented redesign method of used products based on axiomatic design theory and QFD. *Journal of Cleaner Production*, 39, 79-86. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.08.032
- Elliott, H. A. (1947). An analysis of the conditions for rupture due to griffith cracks. *Proceedings of the Physical Society*, 59(2), 208-223. doi: 10.1088/0959-5309/59/2/305. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1088/0959-5309/59/2/305>

- Environnement et Changement climatique Canada, (2018). *Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Réacheminement et élimination des déchets solides*.
- Erkman, S. (2004). *Vers une écologie industrielle*. Charles Léopold Mayer. Repéré à <https://books.google.ca/books?id=k67ER6UFuz4C>
- Erkwan, S. (2004). *Vers une écologie industrielle* (2 éd.). Paris, France: Charles Léopold Mayer.
- Fairphone. (2015). *Cost breakdown of the Fairphone 2*. Fairphone.
- Fairphone. (2020). Fairphone 2 Supply Chain. Repéré le 25 juin 2020 à <https://open.sourcemap.com/maps/57bd640851c05c0a5b5a8be1>
- Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J. m., & Van wassenhove, L. n. (2001). The impact of product recovery on logistics network design. *Production and Operations Management*, 10(2), 156-173. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2001.tb00076.x>. Repéré à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1937-5956.2001.tb00076.x>
- Fondation Ellen MacArthur (2014). *Accelerating the scale-up across global supply chains* Ellen MacArthur Foundation.
- Fondation Ellen MacArthur (2015). *Potential for Denmark as circular economy. A case study from: delivering the circular economy - A toolkit for policy makers*. Ellen MacArthur Foundation.
- Fondation Ellen MacArthur, McKinsey, & Stiftungsfonds. (2015). *Circular Economy Report - Growth Within*. Ellen MacArthur Foundation.
- Frank, A., Dalenogare, L., & Ayala, N. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210. doi: 10.1016/j.ijpe.2019.01.004
- Gao, K., Wang, L., Luo, J., Jiang, H., Sadollah, A., & Pan, Q. (2017). Discrete harmony search algorithm for scheduling and rescheduling the reprocessing problems in remanufacturing: a case study. *Engineering Optimization*, 50(6), 965-981. doi: 10.1080/0305215x.2017.1391240
- Gaustad, G., Olivetti, E., & Kirchain, R. (2010). Design for Recycling. *Journal of Industrial Ecology*, 14(2), 286-308. doi: 10.1111/j.1530-9290.2010.00229.x
- Geldron, A. (2016). Métaux stratégiques : la mine urbaine française. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement*, 82, 67-73. doi: <https://doi.org/10.3917/re1.082.0067>

- Gerwin, D. (1993). Manufacturing Flexibility: A Strategic Perspective. *Management Science*, 39(4), 395-410. Repéré à <https://EconPapers.repec.org/RePEc:inm:ormnsc:v:39:y:1993:i:4:p:395-410>
- Geyer, R., & Doctri Blass, V. (2009). The economics of cell phone reuse and recycling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(5-8), 515-525. doi: 10.1007/s00170-009-2228-z
- Ghadge, A., Er Kara, M., Moradlou, H., & Goswami, M. (2020). The impact of Industry 4.0 implementation on supply chains. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(4), 669-686. doi: 10.1108/JMTM-10-2019-0368. Repéré à <https://doi.org/10.1108/JMTM-10-2019-0368>
- Ghazaly, N., Abdo, J., Dakshinamoorthi, M., & Srinivasan, K. (2011). Evaluation of Disc Brake Materials for Squeal Reduction. *Tribology Transactions*, 54, 644-656. doi: 10.1080/10402004.2011.587634
- Ghobakhloo, M. (2018). The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29. doi: 10.1108/JMTM-02-2018-0057
- Ghobakhloo, M. (2019). Industry 4.0, Digitization, and Opportunities for Sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119869
- Giroux, A. (2007). Probabilités et statistique. Département de mathématiques et statistique Université de Montréal.
- Golinska, P., Kosacka, M., Mierzwiak, R., & Werner-Lewandowska, K. (2015). Grey Decision Making as a tool for the classification of the sustainability level of remanufacturing companies. *Journal of Cleaner Production*, 105, 28-40. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.11.040
- Goodall, P., Rosamond, E., & Harding, J. (2014). A review of the state of the art in tools and techniques used to evaluate remanufacturing feasibility. *Journal of Cleaner Production*, 81, 1-15. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.06.014
- Gou, Q., Liang, L., Huang, Z., & Xu, C. (2008). A joint inventory model for an open-loop reverse supply chain. *International Journal of Production Economics*, 116(1), 28-42. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.07.009>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527308002193>
- Govindan, K., Mina, H., Esmaili, A., & Gholami-Zanjani, S. M. (2020). An Integrated Hybrid Approach for Circular supplier selection and Closed loop Supply Chain Network

- Design under Uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 242. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118317
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603-626. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221714005633>
- Graedel, T. E. (1996). On the concept of industrial ecology. *Annual Review of Energy and the Environment*, 69-98.
- Grimaud, G. (2019). *Conception des scénarios de recyclage pilotée par l'évaluation des performances des procédés* (Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers).
- Guarnieri, P., e Silva, L. C., & Levino, N. A. (2016). Analysis of electronic waste reverse logistics decisions using Strategic Options Development Analysis methodology: A Brazilian case. *Journal of Cleaner Production*, 133, 1105-1117. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.025
- Gunasekaran, A., Subramanian, N., & Tiwari, M. (2016). Information technology (IT) governance in Internet of Things (IoT) supply chain networks. *Industrial Management & Data Systems*, 116, 1-6. doi: 10.1108/IMDS-06-2016-0244
- H. J. Parkinson, G. T. (2003). Analysis and taxonomy of remanufacturing industry practice. *Journal of Process Mechanical Engineering*, 217, 243-256.
- Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D., & Heinz, M. (2015). How Circular is the Global Economy?: An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005. *Journal of Industrial Ecology*, 19(5), 765-777. doi: 10.1111/jiec.12244
- Haddud, A., DeSouza, A., Khare, A., & Lee, H. (2017). Examining potential benefits and challenges associated with the Internet of Things integration in supply chains. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 28(8), 1055-1085. doi: 10.1108/jmtm-05-2017-0094
- Hahn, H., Krautkremer, B., Hartmann, K., & Wachendorf, M. (2014). Review of concepts for a demand-driven biogas supply for flexible power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 383-393. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.085>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113006254>
- Hall C. A. S., Klitgaard K. A. (2012). *Energy and the Wealth of Nations : Understanding the*

Biophysical Economy (1 éd.). New York: Springer Verlag. doi: 10.1007/978-1-4419-9398-4

Hedengren, J. D., Shishavan, R. A., Powell, K. M., & Edgar, T. F. (2014). Nonlinear modeling, estimation and predictive control in APMonitor. *Computers & Chemical Engineering*, 70, 133-148. doi: 10.1016/j.compchemeng.2014.04.013

Hiraki, T., Takeda, O., Nakajima, K., Matsubae, K., Nakamura, S., & Nagasaka, T. (2011). Thermodynamic criteria for the removal of impurities from end-of-life magnesium alloys by evaporation and flux treatment. *Sci Technol Adv Mater*, 12(3), 035003. doi: 10.1088/1468-6996/12/3/035003. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27877407>

Hof, L. A. (2018). *High-precision micro-machining of glass for mass-personalization* (Concordia University, Montréal).

Hofmann, E., & Rüsch, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89, 23-34. doi: 10.1016/j.compind.2017.04.002

Ikemiya, M., & Rosner, D. K. (2013). Broken probes: toward the design of worn media. *Personal and Ubiquitous Computing*, 18(3), 671-683. doi: 10.1007/s00779-013-0690-y

Ilgin, M. A., & Gupta, S. M. (2011). Performance improvement potential of sensor embedded products in environmental supply chains. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(6), 580-592. doi: 10.1016/j.resconrec.2010.05.001

Iqbal, A., Zhao, G., Suhaimi, H., He, N., Hussain, G., & Zhao, W. (2020). Readiness of subtractive and additive manufacturing and their sustainable amalgamation from the perspective of Industry 4.0: a comprehensive review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 111(9), 2475-2498. doi: 10.1007/s00170-020-06287-6. Repéré à <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06287-6>

Jancovici, J.-M. (2017). *L'avenir climatique - Quel temps ferons-nous ?*. Le Seuil. Repéré à <https://books.google.fr/books?id=XrEuDwAAQBAJ>

Jensen, J. P., Prendeville, S. M., Bocken, N. M. P., & Peck, D. (2019). Creating sustainable value through remanufacturing: Three industry cases. *Journal of Cleaner Production*, 218, 304-314. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.301

Jian, C., Gao, J., & Ao, Y. (2017). Automatic surface defect detection for mobile phone screen glass based on machine vision. *Applied Soft Computing*, 52, 348-358. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.10.030>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494616305531>

- Jiang, Z., Zhou, T., Zhang, H., Wang, Y., Cao, H., & Tian, G. (2016). Reliability and cost optimization for remanufacturing process planning. *Journal of Cleaner Production*, 135, 1602-1610. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.11.037
- Joshi, A. D., & Gupta, S. M. (2019). Evaluation of design alternatives of End-Of-Life products using internet of things. *International Journal of Production Economics*, 208, 281-293. doi: 10.1016/j.ijpe.2018.12.010
- Kagermann, H., Lukas, W.-D., & Wahlster, W. (2011). Industrie 4.0: Mitdem Internet derDinge aufdem Wegzur 4. industriellen Revolution. *VDI nachrichten*, 13.
- Khor, K.-S., & Udin, Z. (2011). *Impact of Reverse Logistics Product Disposition towards Business Performance in Malaysian E&E Companies* (Vol. 2012). doi: 10.5171/2012.699469
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005
- Koren, Y., Hu, S. J., Gu, P., & Shpitalni, M. (2013). Open-architecture products. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62, 719–729. doi: 10.1016/j.cirp.2013.06.001
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143, 37-46. doi: 10.1016/j.ecolecon.2017.06.041
- Kumar, V. V., & Chan, F. T. S. (2011). A superiority search and optimisation algorithm to solve RFID and an environmental factor embedded closed loop logistics model. *International Journal of Production Research*, 49(16), 4807-4831. doi: 10.1080/00207543.2010.503201
- Lafou, M., Mathieu, L., Pois, S., & Alochet, M. (2016). Manufacturing System Flexibility: Product Flexibility Assessment. *Procedia CIRP*, 41, 99-104. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.046>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827115011257>
- Lavery, D. G., Pennell, L., Pennell, N., & Evans, S. (2014). Food and Beverage Sector Non-Labour Resource Efficiency : Unlocking Cost Savings , Jobs and Environmental Improvements. Dans.
- Lawton, K., Carter, C., Lee, J., Tan, A., Trigo, A. d. P., Luscombe, D., & Briscoe, S. (2013). *The opportunities to business of improving resource efficiency*. Bio Intelligence Service & Amec.

- Lee, C. K. M., & Chan, T. M. (2009). Development of RFID-based Reverse Logistics System. *Expert Systems with Applications*, 36(5), 9299-9307. doi: 10.1016/j.eswa.2008.12.002
- Li, D., Liang, L.-Q., & Zhang, W.-J. (2014). Defect inspection and extraction of the mobile phone cover glass based on the principal components analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73(9-12), 1605-1614. doi: 10.1007/s00170-014-5871-y
- Lieder, M., & Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, 115, 36-51. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.12.042
- Liu, H., Chen, Y.-p., Peng, X.-q., & Xie, J.-m. (2011). A classification method of glass defect based on multiresolution and information fusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56, 1079-1090. doi: 10.1007/s00170-011-3248-z
- Lo, H.-C., & Yu, R.-Y. (2013). A study of quality management strategy for reused products. *Reliability Engineering & System Safety*, 119, 172-177. doi: 10.1016/j.res.2013.05.009
- Lundmark, P., Sundin, E., & Björkman, M. (2008). Industrial Challenges within the Remanufacturing System. *Dans Swedish Production Symposium*.
- Luthra, S., & Mangla, S. (2018). When strategies matter: Adoption of sustainable supply chain management practices in an emerging economy's context. *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 194-206. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.07.005
- Magomedov, I. A., Orlova, I. V., Lisichko, O. I., & Alikhadzhiev, S. K. (2019). Dynamic fast fracture of smartphone screens. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 378. doi: 10.1088/1755-1315/378/1/012064
- Mahmood, K., Karaulova, T., Otto, T., & Shevtshenko, E. (2017). Performance Analysis of a Flexible Manufacturing System (FMS). *Procedia CIRP*, 63, 424-429. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.123>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117302706>
- Malamas, E. N., Petrakis, E. G. M., Zervakis, M., Petit, L., & Legat, J.-D. (2003). A survey on industrial vision systems, applications and tools. *Image and Vision Computing*, 21(2), 171-188. doi: [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(02\)00152-X](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(02)00152-X). Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026288560200152X>
- Manavalan, E., & Jayakrishna, K. (2019). A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 925-953. doi: 10.1016/j.cie.2018.11.030

- Martínez, S. S., Ortega, J. G., García, J. G., García, A. S., & Estévez, E. E. (2013). An industrial vision system for surface quality inspection of transparent parts. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 68(5), 1123-1136. doi: 10.1007/s00170-013-4904-2. Repéré à <https://doi.org/10.1007/s00170-013-4904-2>
- Matsumoto, M., Yang, S., Martinsen, K., & Kainuma, Y. (2016). Trends and research challenges in remanufacturing. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(1), 129-142. doi: 10.1007/s40684-016-0016-4
- Ming, W., Shen, F., Li, X., Zhang, Z., Du, J., Chen, Z., & Cao, Y. (2020). A comprehensive review of defect detection in 3C glass components. *Measurement*, 158. doi: 10.1016/j.measurement.2020.107722
- Montaigne, I. (2016). *Économie circulaire, réconcilier croissance et environnement*. Institut Montaigne.
- Mourtzis, D., & Doukas, M. (2014). Design and Planning of Manufacturing Networks for Mass Customisation and Personalisation: Challenges and Outlook. *Procedia CIRP*, 19, 1-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.05.004>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114006325>
- Mtalaa, W., & Aggoune, R. (2010). *Un modèle bi-objectif pour la conception de chaînes logistiques vertes*.
- Murdoch, W. J., Singh, C., Kumbier, K., Abbasi-Asl, R., & Yu, B. (2019). Definitions, methods, and applications in interpretable machine learning. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 116(44), 22071-22080. doi: 10.1073/pnas.1900654116. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/31619572>
- Nascimento, D. L. M., Alencastro, V., Quelhas, O. L. G., Caiado, R. G. G., Garza-Reyes, J. A., Rocha-Lona, L., & Tortorella, G. (2019). Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(3), 607-627. doi: 10.1108/jmtm-03-2018-0071
- Network, G. F. (2018). *L'autre déficit de la France - Rapport 2018*.
- Nowakowski, P. (2018). A novel, cost efficient identification method for disassembly planning of waste electrical and electronic equipment. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2695-2707. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.142
- OCDE. (2020). *Environment at a Glance Indicators*. doi: <https://doi.org/10.1787/ac4b8b89-en>. Repéré à <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/ac4b8b89-en>

- Ohno, H., Matsubae, K., Nakajima, K., Kondo, Y., Nakamura, S., & Nagasaka, T. (2015). Toward the efficient recycling of alloying elements from end of life vehicle steel scrap. *Resources, Conservation and Recycling*, 100, 11-20. doi: 10.1016/j.resconrec.2015.04.001
- Ondemir, O., & Gupta, S. M. (2014). Quality management in product recovery using the Internet of Things: An optimization approach. *Computers in Industry*, 65(3), 491-504. doi: 10.1016/j.compind.2013.11.006
- Ondemir, O., Ilgin, M. A., & Gupta, S. M. (2012). Optimal End-of-Life Management in Closed-Loop Supply Chains Using RFID and Sensors. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 8(3), 719-728. doi: 10.1109/tii.2011.2166767
- ONU. (2019). State of commodity dependance 2019. Dans *United Nations Conference on Trade and Development*.
- Oztemel, E., & Gursev, S. (2018). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31. doi: 10.1007/s10845-018-1433-8
- Paraskevas, D., Kellens, K., Renaldi, Dewulf, W., & Duflou, J. R. (2013). Sustainable Metal Management and Recycling Loops: Life Cycle Assessment for Aluminium Recycling Strategies. Dans (pp. 403-408). Springer Singapore.
- Pourmoghaddam, N., & Schneider, J. (2018). Finite-element analysis of the residual stresses in tempered glass plates with holes or cut-outs. *Glass Structures & Engineering*, 3(1), 17-37. doi: 10.1007/s40940-018-0055-z. Repéré à <https://doi.org/10.1007/s40940-018-0055-z>
- Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2018). Towards a consensus on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 179, 605-615. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.224
- Proske, M., Clemm, C., & Richter, N. (2016). *Life Cycle Assessment of the Fairphone 2*. Fraunhofer IZM.
- PwC. (2016). Industry 4.0: global digital operations study 2018. Repéré le 11/09/2020 à <https://www.pwc.com/gx/en/industries/industry-4-0.html>
- Rahman, S. M. M., Perry, N., Müller, J. M., Kim, J., & Laratte, B. (2020). End-of-Life in industry 4.0: Ignored as before? *Resources, Conservation and Recycling*, 154. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104539
- Rajput, S., & Singh, S. P. (2019). Connecting circular economy and industry 4.0. *International Journal of Information Management*, 49, 98-113. doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2019.03.002

- Rebaud, A.-L. (2017). Vers une économie circulaire. *European think do tank- Pour la solidarité*, 37.
- Reck, B. K., & Graedel, T. E. (2012). Challenges in Metal Recycling. *Science*, 337, 690-695.
- Reimann, M., Xiong, Y., & Zhou, Y. (2019). Managing a closed-loop supply chain with process innovation for remanufacturing. *European Journal of Operational Research*, 276(2), 510-518. doi: 10.1016/j.ejor.2019.01.028
- Rizos, V., Tuokko, K., & Behrens, A. (2017). *The Circular Economy : A review of definitions, processes and impacts* Centre for European Policy Studies.
- Sauvé S., Normandin D., McDonald M. (2016). *L'économie circulaire : Une transition incontournable*. Les Presses de l'Université de Montréal.
- Sakai, S.-i., Yoshida, H., Hiratsuka, J., Vandecasteele, C., Kohlmeyer, R., Rotter, V. S., . . . Yano, J. (2013). An international comparative study of end-of-life vehicle (ELV) recycling systems. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 16(1), 1-20. doi: 10.1007/s10163-013-0173-2
- Schaub, F., Seifert, J., Honold, F., Müller, M., Rukzio, E., & Weber, M. (2014). *Broken display = broken interface* présentée à Proceedings of the 32nd annual ACM conference on Human factors in computing systems - CHI '14. doi: 10.1145/2556288.2557067
- Schott. (2020). Xensation®. Repéré le 10/10/2020 à <https://www.schott.com/xensation/english/index.html>
- Sengupta, A. (2018). Cobalt Critical to Lithium Ion Battery Chemical Mix *Cobalt Invest. News*, 27, 5.
- Shi, J., Zhang, G., & Sha, J. (2011). Optimal production and pricing policy for a closed loop system. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(6), 639-647. doi: 10.1016/j.resconrec.2010.05.016
- Shi, P., Yan, B., Shi, S., & Ke, C. (2014). A decision support system to select suppliers for a sustainable supply chain based on a systematic DEA approach. *Information Technology and Management*, 16(1), 39-49. doi: 10.1007/s10799-014-0193-1
- Shohin, A., Rooss, P., Ray, Y. Z., & Xun, X. (2019). The Degree of Mass Personalisation under Industry 4.0. Dans *52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems*.
- Singh, T., Dua, R. L., Agrawal, S., & Acharya, A. (2013). Detection of Defects in Glass Sheet using C.S.C based Segmentation Method. *International Journal of Computer Applications*, 68.

- Sinha, R., Laurenti, R., Singh, J., Malmström, M. E., & Frostell, B. (2016). Identifying ways of closing the metal flow loop in the global mobile phone product system: A system dynamics modeling approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 113, 65-76. doi: 10.1016/j.resconrec.2016.05.010
- Skerlos, S. J. (2015). Promoting Effectiveness in Sustainable Design. *Procedia CIRP*, 29, 13-18. doi: 10.1016/j.procir.2015.02.080
- Soleimani, H., & Govindan, K. (2014). Reverse logistics network design and planning utilizing conditional value at risk. *European Journal of Operational Research*, 237(2), 487-497. doi: 10.1016/j.ejor.2014.02.030
- Spena, P. R., Holzner, P., Rauch, E., Vlotni, R., & Matt, D. T. (2016). Requirements for the Design of Flexible and Changeable Manufacturing and Assembly Systems: A SME-survey. *Procedia CIRP*, 41, 207-212. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.018>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116000299>
- Stahel, W. R. (2013). Policy for material efficiency--sustainable taxation as a departure from the throwaway society. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*, 371(1986), 20110567. doi: 10.1098/rsta.2011.0567. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23359738>
- Sukhodolov, Y. A. (2019). The Notion, Essence, and Peculiarities of Industry 4.0 as a Sphere of Industry. Dans E. G. Popkova, Y. V. Ragulina & A. V. Bogoviz (Éds.), *Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century* (pp. 3-10). Cham: Springer International Publishing. doi: 10.1007/978-3-319-94310-7_1. Repéré à https://doi.org/10.1007/978-3-319-94310-7_1
- Tansel, B. (2017). From electronic consumer products to e-wastes: Global outlook, waste quantities, recycling challenges. *Environ Int*, 98, 35-45. doi: 10.1016/j.envint.2016.10.002. Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27726897>
- Teigeiro, S. (2017). *Economie circulaire au Québec: opportunités et impacts économiques*. Polytechnique Montreal, Groupe de recherche en Gestion et mondialisation de la technologie. Repéré à <https://EconPapers.repec.org/RePEc:epm:raport:2017-01>
- Temur, G., & Bolat, B. (2012). Reverse logistics network design integrated with product return forecasting approach. Dans *17th International Working Seminar on Production Economics*, (pp. 483-497).
- Thoben, K.-D., Wiesner, S., & Wuest, T. (2017). "Industrie 4.0" and Smart Manufacturing – A Review of Research Issues and Application Examples. *International Journal of Automation Technology*, 11, 4-19. doi: 10.20965/ijat.2017.p0004

- Tjahjono, B., Esplugues, C., Enrique, A., & Peláez-LourIoT, G. (2017). What does Industry 4.0 mean to Supply Chain? *Procedia Manufacturing*, 13, 1175-1182. doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.191
- Tonanont, A., Yimsiri, S., Jitpitaklert, W., & Rogers, K. J. (2008). Performance Evaluation in Reverse Logistics with Data Envelopment Analysis. *IIE Annual Conference. Proceedings*, 764-769. Repéré à <https://search.proquest.com/docview/192466278?accountid=27231>
- Toth, G., & Szigeti, C. (2016). The historical ecological footprint: From over-population to over-consumption. *Ecological Indicators*, 60, 283-291. doi: 10.1016/j.ecolind.2015.06.040
- Tranchant, C., & Vasseur, L. (2005). L'ecologie industrielle une approche écosystemique. Dans *Colloq. développement durable leçons Perspect* (pp. 203-210).
- Turan, P., Ğsmaİl, K., Hadi, G., Panos, M. P., & Belkıs, T. (2016). An Experimental Research on Closed Loop Supply Chain Management with Internet of Things.
- Turner, R., & Pearce, D. (1992). The Ethical Foundations of Sustainable Economic Development. Dans J. Press (Éd.), *Advances in Human Ecology* (pp. 177-195).
- Uçar, E., Dain, M.-A. L., & Joly, I. (2020). Digital Technologies in Circular Economy Transition: Evidence from Case Studies. *Procedia CIRP*, 90, 133-136. doi: 10.1016/j.procir.2020.01.058
- Vadde S, K. S., Gupta S.M., Zeid. (2008). Product life cycle monitoring via embedded sensors. . Dans L. Gupta SM & AJD (Éds.), *Environment Conscious Manufacturing* (pp. 91–103). Boca Raton: CRC.
- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 – A Glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233-238. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918300672>
- van Weelden, E., Mugge, R., & Bakker, C. (2016). Paving the way towards circular consumption: exploring consumer acceptance of refurbished mobile phones in the Dutch market. *Journal of Cleaner Production*, 113, 743-754. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.11.065
- McDonough, W.Braungart M. (2010). *Cradle to cradle: Remaking the Way We Make Things*.
- Wagire, A., Rathore, A., & Jain, R. (2019). Analysis and synthesis of Industry 4.0 research landscape: Using latent semantic analysis approach. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31. doi: 10.1108/JMTM-10-2018-0349

- Wamba, S. F., Gunasekaran, A., Akter, S., Ren, S. J.-f., Dubey, R., & Childe, S. J. (2017). Big data analytics and firm performance: Effects of dynamic capabilities. *Journal of Business Research*, 70, 356-365. doi: 10.1016/j.jbusres.2016.08.009
- Wang, S. (2020). *Promoting a Circular Economy in the Mobile Phone Product System in China* (KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden).
- Wijkman, A., & Skånberg, K. (2015). *L'Économie Circulaire et ses Bénéfices Sociétaux. Des Avancées Réelles pour l'Emploi et le Climat dans une Économie basée sur les Énergies Renouvelables et l'Efficacité des Ressources*. Club de Rome.
- Wilson, J. M., Piya, C., Shin, Y. C., Zhao, F., & Ramani, K. (2014). Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis. *Journal of Cleaner Production*, 80, 170-178. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.05.084
- Wondraczek, L., Mauro, J. C., Eckert, J., Kühn, U., Horbach, J., Deubener, J., & Rouxel, T. (2011). Towards Ultrastrong Glasses. *Advanced Materials*, 23(39), 4578-4586. doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201102795>. Repéré à <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adma.201102795>
- Yotat, F. E. K. (2017). *Optimisation des stratégies de fabrication et de réutilisation de l'aluminium en logistique inverse* (École de technologie supérieure, Montréal).
- Yousefian-Jazi, A., Ryu, J.-H., Yoon, S., & Liu, J. J. (2014). Decision support in machine vision system for monitoring of TFT-LCD glass substrates manufacturing. *Journal of Process Control*, 24(6), 1015-1023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2013.12.009>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959152413002643>
- Yuan, Z.-C., Zhang, Z.-T., Su, H., Zhang, L., Shen, F., & Zhang, F. (2018). Vision-Based Defect Detection for Mobile Phone Cover Glass using Deep Neural Networks. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 19(6), 801-810. doi: 10.1007/s12541-018-0096-x. Repéré à <https://doi.org/10.1007/s12541-018-0096-x>
- Zhang, F. (2014). *Contribution to methods and tools supporting eco-design practises in companies* (Université de Grenoble). Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01294606>
- Zhang, Y., Liu, S., Liu, Y., Yang, H., Li, M., Huisingh, D., & Wang, L. (2018). The 'Internet of Things' enabled real-time scheduling for remanufacturing of automobile engines. *Journal of Cleaner Production*, 185, 562-575. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.061

- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, 3(5), 616-630. doi: <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>. Repéré à <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917307130>
- Zink, T., & Geyer, R. (2017). Circular Economy Rebound. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 593-602. doi: 10.1111/jiec.12545