

Exploration et amélioration de la gestion de l'obsolescence
technologique pour des performances accrues et une chaîne
logistique durable

par

Imen ZAABAR

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE
SUPÉRIEURE COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
DIPLOME DE DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

MONTRÉAL, LE 24 MARS 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Imen ZAABAR, 2026



Cette [licence Creative Commons CC BY-NC-ND 4.0](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 créditer 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

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Yvan Beaugard, directeur de thèse
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Marc Paquet, codirecteur de thèse
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Silvio Melhado, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Amin Chaabane, membre du jury
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

Mme. Neila Al-asli, examinatrice externe
Département de génie industriel, Université du Québec à Trois-Rivières

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

LE 02 MARS 2026

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Cette thèse est l'aboutissement d'un long chemin que je n'aurais pu parcourir seule et sans les conseils et le soutien de mon directeur de thèse Prof.Yvan Beauregard et mon codirecteur Prof.Marc Paquet. Je suis honorée d'avoir eu l'opportunité de travailler et d'apprendre sous leur supervision tout au long de ces années. Je leur suis profondément reconnaissante pour leur temps, leur expertise, leur patience et leurs précieux commentaires.

Je remercie sincèrement les membres du jury, Mr.Silvio Melhado, Mr.Amin Chaabane et Mme.Neila Al-asli, d'avoir accepté d'évaluer ce travail. Vos remarques et commentaires ont bien enrichi cette thèse.

Réaliser ce doctorat au sein de l'ÉTS a été une aventure humaine avant tout. Merci à mes 'compagnons de galère', Yosra, Marius, Léo et Héloïse, pour l'entraide, les débats et le soutien mutuel face à un sujet de recherche tout jeune et capricieux.

Je n'oublie pas l'administration et le personnel technique, dont l'efficacité a rendu mon quotidien bien plus simple.

Un immense merci à mes parents, mes beaux-parents et mes frères pour leur soutien indéfectible et pour avoir cru en moi, même dans les moments de doute. À mon conjoint Marwen: merci d'avoir été mon roc, mon premier lecteur et mon soutien inconditionnel. Tu as porté sur tes épaules bien plus que ta part de notre quotidien pour me permettre d'aller au bout de ce rêve. Merci d'avoir supporté mes doutes et mes silences. Sans ton amour et ta patience infinie, ce manuscrit n'aurait jamais vu le jour.

À Jad et Yafa qui ont été mon plus beau projet en parallèle de ces recherches. Sachez que chaque page de cette thèse a été portée par l'amour que je vous porte et par le désir de vous offrir le meilleur.

Exploration et amélioration de la gestion de l'obsolescence technologique pour des performances accrues et une chaîne logistique durable

IMEN ZAABAR

RÉSUMÉ

En raison d'un marché très concurrentiel et en pleine mutation, les composants électroniques évoluent plus rapidement que la durée de vie estimée de la plupart des équipements et systèmes qui les composent. Cela les expose au risque d'obsolescence technologique. Il s'agit d'un facteur important qui perturbe les organisations et les performances de leurs systèmes manufacturiers, et en particulier leurs chaînes logistiques. Ce risque doit être surveillé de près et géré d'une manière durable. La question de l'obsolescence technologique suscite de plus en plus d'attention, en particulier dans les systèmes complexes où le décalage entre les cycles de vie est plus grand. Entre des composants ayant des cycles de vie de 24 à 60 mois et des systèmes ayant des cycles de vie de 30 à 50 ans, l'écart est important, et le risque d'obsolescence est inévitable non seulement en technologie, mais aussi en connaissances, compétences, outils et matériaux. L'objectif du projet CRIAQ-LEAN-501-T6 est d'explorer le risque d'obsolescence et d'améliorer sa gestion. Cette recherche, qui fait partie du projet cité, vise à explorer l'impact de l'obsolescence sur les performances des organisations et à la gérer de manière éthique en tenant en compte les quatre dimensions du développement durable. Partant d'un besoin industriel dans le secteur de l'avionique, la première étape pour résoudre ce problème consiste à explorer les enjeux et les défis de l'obsolescence technologique des composants et équipements électroniques et à démontrer son impact potentiel sur les performances des organisations à l'aide d'une étude de cas. Afin de mettre en place une chaîne d'approvisionnement durable tout en atténuant l'obsolescence, le lien entre l'obsolescence des composants et la production de déchets des équipements électroniques et électriques a été particulièrement étudié. Après avoir évalué l'impact éventuel, l'étape suivante porte sur l'amélioration et le contrôle du système de gestion de l'obsolescence afin de mettre en place des stratégies de résolution plus durables. Sur la base de la méthodologie de la science de la conception, un modèle de maturité a été développé et validé avec une application industrielle. Le modèle de maturité basé sur le CMMI a été conçu pour mesurer et améliorer en continu le processus de gestion de l'obsolescence. Parallèlement, un cas spécifique d'obsolescence de processus a été résolu à l'aide d'une méthodologie multicritères renforcée par un modèle d'apprentissage automatique utilisant à la fois la science de la conception et l'étude de cas. Enfin, un modèle de décision multicritères inclus des critères économiques, technologiques, sociaux et environnementaux a été développé afin d'évaluer toutes les stratégies de résolution disponibles pour résoudre le problème de manière durable et éthique. Les principaux indicateurs de performance impactés ont été pris en considération dans la conception d'un modèle de prise de décision dans la résolution de l'obsolescence afin de garantir un développement durable du système manufacturier. En conséquence, l'étude a montré que l'obsolescence technologique est une perturbation critique dans le cycle de vie des systèmes. Elle perturbe les projets, entraîne des retards dans les calendriers, engendre des coûts

VIII

importants et produit des déchets nocifs issus d'équipements électriques et électroniques. Cet impact a pu être atténué par une prise de décision plus durable.

Mots-clés : obsolescence, maturité, décision multicritère, développement durable, déchets d'équipements électriques et électroniques

Exploration and improvement of obsolescence management for higher performances and sustainable supply chain

Imen ZAABAR

ABSTRACT

Due to a highly competitive and rapidly changing market, electronic components are evolving faster than the estimated lifespan of most of the equipment and systems that contain them. This exposes them to the risk of technological obsolescence. This is a significant factor that disrupts organizations and the performance of their manufacturing systems, particularly their supply chains. The issue of technological obsolescence is receiving increasing attention, especially in complex systems where the gap between lifecycles is greater. Between components with lifecycles of 24 to 60 months and systems with lifecycles of 30 to 50 years, the difference is substantial, and the risk of obsolescence is unavoidable not only in technology but also in knowledge, skills, tools, and materials. This risk must be closely monitored and managed sustainably. The objective of the CRIAQ-LEAN-501-T6 project is to explore the risk of obsolescence and improve its management. This research, part of the aforementioned project, aims to explore the impact of obsolescence on organizational performances and to manage it ethically, considering the four dimensions of sustainable development. Starting with an industrial need in the avionics sector, the first step in addressing this problem is to explore the issues and challenges of technological obsolescence in electronic components and equipment and to demonstrate its potential impact on organizational performance through a case study. To establish a sustainable supply chain while mitigating obsolescence, the link between component obsolescence and the production of waste from electronic and electrical equipment was investigated. After assessing the potential impact, the next step focuses on improving and controlling the obsolescence management system to implement more sustainable resolution strategies. Based on the design science methodology, a maturity model was developed and validated with an industrial application. The CMMI-based maturity model was designed to measure and continuously improve the obsolescence management process. In parallel, a specific case of process obsolescence was solved with a multicriteria methodology enhanced by a machine-learning model that combines design science and case studies. Finally, a multicriteria decision model, including economic, technological, social, and environmental criteria, was developed to evaluate all available resolution strategies for addressing the problem sustainably and ethically. The main impacted performance indicators were considered in the design of a decision-making model for obsolescence resolution to ensure the sustainable development of the manufacturing system. Consequently, the study showed that technological obsolescence is a critical disruption in the system's lifecycle. It disrupts projects, causes schedule delays, generates significant costs, and produces harmful waste from electrical and electronic equipment. This impact could be mitigated through more sustainable decision-making.

Keywords: obsolescence, maturity, multicriteria decision making, sustainability, waste from electrical and electronic equipment

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTERATURE	13
1.1 Les fondamentaux de la gestion de l'obsolescence	13
1.1.1 L'histoire de l'obsolescence technologique.....	13
1.1.2 Définition de l'obsolescence.....	14
1.1.3 Les approches de gestion de l'obsolescence	16
1.1.3.1 La gestion réactive.....	17
1.1.3.2 La gestion proactive	18
1.1.3.3 La gestion stratégique.....	21
1.2 État de l'art	22
1.2.1 La gestion de l'obsolescence technologique.....	25
1.2.2 L'obsolescence et environnement.....	26
1.2.3 Le processus de gestion de l'obsolescence et la mesure de maturité.....	27
1.2.4 La prise de décision en gestion de l'obsolescence.....	28
1.3 Identification des pistes de recherche.....	31
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	33
2.1 Choix de la démarche méthodologique	33
2.2 Stratégie de recherche.....	34
2.3 Démarche conceptuelle d'amélioration de la gestion d'obsolescence	36
2.3.1 Étape 1 : Explorer la problématique et évaluer l'impact	36
2.3.2 Étape 2 : Atténuer le risque et résoudre un cas.....	39
2.3.3 Étape 3 : Prendre des décisions durables	43
CHAPITRE 3 L'OBSOLESCENCE TECHNOLOGIQUE DES COMPOSANTS ET ÉQUIPEMENTS ÉLECTRONIQUES : ENJEUX ET DÉFIS.....	47
3.1 Introduction	48
3.2 L'obsolescence des systèmes à long cycle de vie.....	49
3.2.1 La gestion de cycle de vie (PLM : Product Life Cycle Management).....	50

3.2.2	La gestion de l'obsolescence	55
3.2.2.1	La gestion réactive.....	56
3.2.2.2	La gestion proactive	60
3.2.2.3	La gestion stratégique.....	64
3.2.3	Les modèles de prise de décision en gestion de l'obsolescence pour les produits à long cycle de vie	66
3.3	L'obsolescence des équipements électriques et électroniques et les enjeux environnementaux	68
3.3.1	La tendance en production	69
3.3.2	La tendance de consommation.....	71
3.3.3	L'obsolescence des composants électriques et électroniques : les déchets EEE et l'environnement.....	72
3.4	Conclusion.....	74
CHAPITRE 4 A EVALUATION AND VALIDATION OF A MATURITY MODEL IN OBSOLESCENCE MANAGEMENT FOR INCREASED PERFORMANCES.....		77
4.1	Introduction	79
4.2	Research Methodology	82
4.3	Obsolescence management maturity model	83
4.4	Formulating the maturity model.....	83
4.5	Conclusion and discussion	86
CHAPITRE 5 A TWO PHASE PART FAMILY FORMATION MODEL TO OPTIMIZE RESOURCE PLANNING: A CASE STUDY IN THE ELECTRONICS INDUSTRY		89
5.1	Introduction	91
5.2	Literature review	93
5.3	Problem description and proposed methodology	97
5.3.1	Problem statement.....	97
5.3.2	Methodology details	102
5.3.2.1	Calculate similarity	103
5.3.2.2	Form clusters – Agglomerative Hierarchical Clustering.....	106
5.3.2.3	Determine the optimal number of clusters using multicriteria decision making tool	108

5.4	Case study.....	111
5.4.1	The case study general framework	111
5.4.2	Adaptation of the proposed two-phase method to industrial case of partner company.....	112
5.4.2.1	Phase 1 – Part family formation	113
5.4.2.2	Data processing	113
5.4.2.3	Clustering algorithm.....	114
5.4.2.4	Clustering performance	116
5.4.3	Phase 2 – decision making process	117
5.5	Conclusion and future work	119
CHAPITRE 6 A SUSTAINABLE MULTICRITERIA DECISION FRAMEWORK FOR OBSOLESCENCE RESOLUTION STRATEGY SELECTION		124
6.1	Introduction	122
6.2	Literature review	124
6.3	Materials and methods.....	128
6.3.1	Alternatives	131
6.3.2	Criteria	132
6.3.3	Criteria weights.....	133
6.3.4	Outranking	134
6.3.4.1	ELECTRE III	134
6.3.4.2	PROMETHEE.....	136
6.4	Case study.....	138
6.5	Results and discussion.....	141
6.5.1	MCDM results	141
6.5.2	Sensitivity analysis.....	142
6.6	Conclusion and future work	143
CHAPITRE 7 DISCUSSION		147
7.1	Justification de la problématique de recherche.....	147
7.2	Synthèse des développements scientifiques.	148
7.2.1	1 ^{er} volet : exploration et analyse d’impact de l’obsolescence.....	149
7.2.2	2 ^{ème} volet : mesure de la maturité et résolution d’un cas d’obsolescence de processus	151

7.2.3	3 ^{ème} volet : prise de décisions durables en gestion d'obsolescence	154
7.3	Conclusion	156
	CONCLUSION GÉNÉRALE	159
ANNEXE I	THE IMPACT OF PARTS OBSOLESCENCE ON ORGANIZATION'S PERFORMANCES: A CASE STUDY IN THE AERONAUTIC INDUSTRY	163
ANNEXE II	USING MULTICRITERIA DECISION MAKING METHODS TO MANAGE SYSTEMS OBSOLECENCE	177
	BIBLIOGRAPHIE	189

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 0.1	Liens entre les objectifs de la thèse et les publications scientifiques.....	11
Tableau 1.1	Résumé des plus importantes publications dans la prise de décision en gestion de l'obsolescence.....	30
Tableau 2.1	Évaluation des travaux par les quatre critères de qualité	39
Tableau 3.1	Définition des phases de cycle de vie d'un produit	52
Tableau 3.2	Les dernières phases de cycle de vie des composants électronique.....	54
Tableau 4.1	The number of PA, GG, SG per maturity level.....	85
Tableau 5.1	Example of the scaling for the data from industrial partner.....	114
Tableau 5.2	Best number of clusters using the 30 clustering indexes and the best number of clusters giving by ELECTRE III.	118
Tableau 5.3	Performances comparison between the actual situation, the theoretical model and the proposed model for set #7.	118
Tableau 6.1	Criteria table.....	131
Tableau 6.2	Performance matrix	138
Tableau 6.3	Normalized criteria weights obtained using the swing and pairwise methods	139
Tableau 6.4	Description of different scenarios' parameters	140
Tableau 6.5	Criteria thresholds for ELECTRE III.....	140
Tableau 6.6	Ranking results for all scenarios	141
Tableau 6.7	PROMETHEE stability intervals for scenario 3	143

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	Vue holistique de l'obsolescence 4
Figure 0.2	Illustration des concepts clés de la recherche et l'acheminement stratégique des travaux 7
Figure 0.3	Vue détaillée sur l'organisation de la thèse..... 9
Figure 1.1	Processus suivi de la recherche et la veille bibliographique 22
Figure 1.2	Réseaux d'occurrences de mot clés généré dans l'analyse bibliographique par VOSviewer 24
Figure 1.3	Les trois axes de recherche de l'étude..... 25
Figure 2.1	Détails de la méthodologie de recherche 34
Figure 2.2	Récapitulatif de la méthodologie de recherche 35
Figure 2.3	Sources de l'étude exploratoire de l'impact de l'obsolescence technologique 37
Figure 2.4	Étape de la méthodologie de l'étude de cas selon Yin (2013) 38
Figure 2.5	Méthodologie de science de conception appliquée au développement du modèle de maturité tirée de Zaabar et al. (2017) 40
Figure 2.6	Méthodologie de recherche pour la résolution d'un cas d'obsolescence de processus. 42
Figure 2.7	Méthodologie de recherche du développement d'un modèle multicritère de prise de décision en gestion d'obsolescence..... 44
Figure 2.8	Prise de décision durable en gestion de l'obsolescence technologique 45
Figure 3.1	Courbe de cycle de vie d'un produit. 51
Figure 3.2	Le nouveau modèle de cycle de vie des composants électroniques..... 53
Figure 3.3	Le plan PDCA pour la gestion de l'obsolescence des composants électroniques. 55
Figure 3.4	Les trois niveaux de gestion de l'obsolescence et leurs extrants. 56

XVIII

Figure 3.5	Processus de planification de la mise à jour de la conception.	66
Figure 3.6	Quantité d'équipements électriques et électroniques sélectionnés mis sur le marché entre 2011 et 2017 en Europe.	70
Figure 3.7	Provenance des déchets électriques et électroniques et leur répartition selon les continents.	74
Figure 4.1	Design research methodology for maturity model development	82
Figure 4.2.	An overview for obsolescence management levels.	84
Figure 4.3.	Decision tree of moving from a ML to another.	84
Figure 5.1	Data flow description from the internal data base to the production and planning optimizer.	98
Figure 5.2	Production planning map using families operational work sheets.....	99
Figure 5.3	The paper methodology flow chart.	103
Figure 5.4	Clusters tree obtained by Agglomerative Hierarchical Clustering algorithm.	107
Figure 5.5	Main linkage algorithms.	108
Figure 5.6	Global principle of ELECTRE III method.....	111
Figure 5.7	The case study general framework.....	112
Figure 5.8	Error calculations for all clustering options for data set#7.	115
Figure 5.9	Hubert and Dindex statistical indexes plot to select the best number of clusters.....	116
Figure 5.10	Optimal number of clusters as given by statistical indexes.	117
Figure 6.1	Research methodology chart.	130

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ABC	Activity-Based Costing
ABM	Activity-Based Management
BB	Bridge Buy
BoM	Bill of Materials
CoS	Component on Specification
COTS	Commercial Off The Shelf
DMSMS	Diminishing Manufacturing Sources and Material Shortages
DoD	Department of Defense
EEE	Electronic and Electrical Equipment
EoL	End of Life
FFF	Forme-Format-Fonctionnalité
FIDO	Functionality Improvement Dominated Obsolescence
IRM	Indice Risque Matériel
LTB	Last Time Buy
LCC	Life Cycle Cost
OCM	Original Component Manufacturer
OMP	Obsolescence Management Plan
ORS	Obsolescence Resolution Strategy
PCN	Product Change Notification
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PDN	Product Discontinuance Notification

XX

PLM	Product Lifecycle Management
SCLSC	Sustainable Closed Loop Supply Chain
SDS	Sustainment Dominated Systems
TOMCAT	Total Obsolescence Management Capability Assessment Tool
TRL	Technology Readiness Level
WEEE	Waste from Electronic and Electrical Equipment

INTRODUCTION

0.1 Contexte de la recherche

Au cours des dernières décennies, la technologie a connu une avancée spectaculaire en ampleur et en performances impactant ainsi tous les aspects de la vie au quotidien : communication, santé, éducation, mobilité... etc. Cela a découlé de l'introduction de nouveaux composants électroniques dotés de caractéristiques avancées capables d'assurer des fonctionnalités qui étaient imaginaires il y a quelque temps. La technologie n'est pas spécifique à l'électronique, mais lui est bien associée. L'électronique, bien que matériel, est la raison sous-jacente de toute évolution technologique. Sa mutation a été longtemps guidée par la loi de Moore qui projetait le doublement de la vitesse de traitement des ordinateurs tous les deux ans (Moore, 2011). La philosophie qui régit la loi de Moore stipule que la densité des composants (ou le nombre de transistors dans les circuits intégrés) double tous les 24 mois. Cette vitesse d'évolution a conduit à une pression accrue pour remplacer et/ou mettre à niveau les composants et/ou les modules des produits technologiques manufacturés. Dans les industries "high-tech", telles que l'espace, l'avionique et la défense, la durée de vie des systèmes peut s'étendre sur plusieurs décennies, s'opposant ainsi à la croissance technologique et se trouvent confrontés pendant leur durée de vie à l'obsolescence technologique (Meyer, Pretorius, & Pretorius, 2004). Ce phénomène est dû principalement à l'écart entre la durée de vie du produit ou système (l'ensemble) et celle des pièces/composants (pièces individuelles ou sous-ensembles qui le composent). L'obsolescence d'un composant peut être définie comme une situation dans laquelle celui-ci n'est plus disponible en stock ou ne peut plus être obtenu dans sa version originale auprès de son fabricant d'origine (Bartels, Ermel, Pecht, & Sandborn, 2012; Mastrangelo, Olson, & Summers, 2021; Rojo, Roy, Shehab, & Cheruvu, 2012).

Dans les années 60 et 70, le secteur militaire définissait et contrôlait les spécifications et les requis ainsi de la conception de ses systèmes, comme ils y sont développés exclusivement (Jennings, Dazhong, & Terpenney, 2016). Simplement, dans les années 80, l'introduction des composants électroniques et la fin de la guerre froide ont mis la pression pour limiter les budgets dans le militaire (Singh & Sandborn, 2006). Comme conséquence, dans les années

suivantes, les manufacturiers ont migré du marché des pièces spécialisées vers celui des pièces commerciales à volume élevé. La retombée directe de ce changement a été l'avènement de l'obsolescence technologique dans le secteur militaire et le secteur aérospatial, et plus généralement dans les systèmes complexes à durée de vie très longue.

Les systèmes complexes, tels que les avions, les sous-marins, etc., nécessitent de nombreuses années de conception et de fabrication et sont généralement entretenus pendant des décennies. Ces systèmes comprennent désormais des composants spécifiques CoS(*Component on Specification*) ainsi que des composants « commerciaux » (COTS: Commercial Off The Shelf), qui dépendent fortement des fluctuations du marché et des avancées technologiques. Les COTS ont souvent des cycles de vie plus courts et sont rapidement obsolètes. Les principales caractéristiques de ces systèmes dominés par le maintien en condition opérationnelle sont les suivantes :

- Des exigences de requalification strictes, qui entraînent des coûts élevés de reconception,
- De faibles volumes de production, qui entraînent un contrôle limité ou inexistant de la chaîne d'approvisionnement associée, et
- Des coûts, de maintenance, plus élevés par rapport au coût initial du système.

L'industrie électronique est l'un des secteurs les plus dynamiques de l'économie mondiale. Aux États-Unis, cette industrie a connu une croissance trois fois supérieure à celle de l'économie globale dans les années 1990 (Chien-Ming, Romero, Osterman, Das, & Pecht, 2019). QTEC estime qu'environ 3% du bassin mondial de pièces électroniques devient obsolète chaque mois (Sandborn, 2007). Par exemple, en 2013, plus de 350 000 composants sont devenus obsolètes, ce qui reflète l'ampleur du problème auquel l'industrie est confrontée et la nécessité de le résoudre avec le minimum de dégâts considérant son empreinte économique importante en coûts directs et indirects.

À titre d'exemple, la gestion de l'obsolescence technologique au Département de la Défense des États-Unis (DoD), notamment à travers son programme de gestion des sources de

fabrication en diminution et des pénuries de matériaux (*DMSMS : Diminishing Manufacturing Sources and Material Shortages*), représente un coût substantiel. Ce programme est essentiel pour assurer la disponibilité de pièces critiques, surtout dans des systèmes qui ont une durée de vie plus longue que les technologies utilisées à l'origine. Le DoD consacre des ressources importantes à cette gestion proactive. Des efforts déployés dans l'aviation et la marine américaine pour éviter des problèmes liés à l'obsolescence ont permis d'économiser environ 300 millions de dollars en coûts. Des outils et contrats spécifiques, comme celui de 66,6 millions de dollars attribués à BAE Systems pour le soutien en obsolescence de l'US Air Force, illustrent l'ampleur des dépenses annuelles liées à ces défis. En général, le coût absorbé par le DoD pour gérer l'obsolescence des systèmes électroniques et autres composants critiques peuvent atteindre des centaines de millions de dollars par an, dépendant du programme et des technologies en question. Environ 750M\$ et l'équivalent de 9 milliards de dollars sur 12 ans de 2006 à 2018 y ont été alloués (Adetunji, Bischoff, & Willy, 2018; Wilkinson, 2015).

Dans ce contexte, en plus du secteur militaire américain et européen, plusieurs multinationales se sont impliquées dans la mitigation et la résolution de l'obsolescence pour rester compétitives. Elles offrent des services de soutien à l'obsolescence pour leurs clients, maintiennent la veille technologique avec leurs fournisseurs ou collaborent avec le milieu académique via des projets de recherche. L'atténuation de l'obsolescence est aujourd'hui un avantage capital et une source de compétitivité (Ward & Osiyevskyy, 2025).

L'obsolescence affecte également les systèmes informatiques, qui jouent un rôle crucial dans tous les domaines, que ce soit en santé, en énergie, en transport, etc. Avec un impact très important sur la sécurité des usagers (Park et al., 2025). Ces systèmes fonctionnent avec du matériel (à base de composants électriques et électroniques) et des logiciels; ils sont interdépendants. L'obsolescence de l'un ou l'autre peut parfois conduire à des situations critiques. L'obsolescence affecte ainsi un microprocesseur qui deviendra obsolète ou du fait que de nouvelles applications nécessitant des calculs plus intensifs ne fonctionnent plus correctement. Une tablette devient progressivement inutilisable si l'on ne peut pas mettre à jour les applications. Ces programmes, à un moment, ne seront plus compatibles avec le

système d'exploitation. Dans ce dernier cas, nous ne sommes pas en présence d'un problème d'obsolescence de composant électronique, mais d'obsolescence d'un logiciel qui est le système d'exploitation.

Nous constatons que, même si l'obsolescence est très souvent associée à la technologie électronique, elle affecte aussi largement les systèmes informatiques, incluant les logiciels. On fait donc face à une problématique plus large que l'obsolescence d'un composant électronique, mais aussi le logiciel, la technicité et les connaissances... etc. (Rojo et al, 2012a).

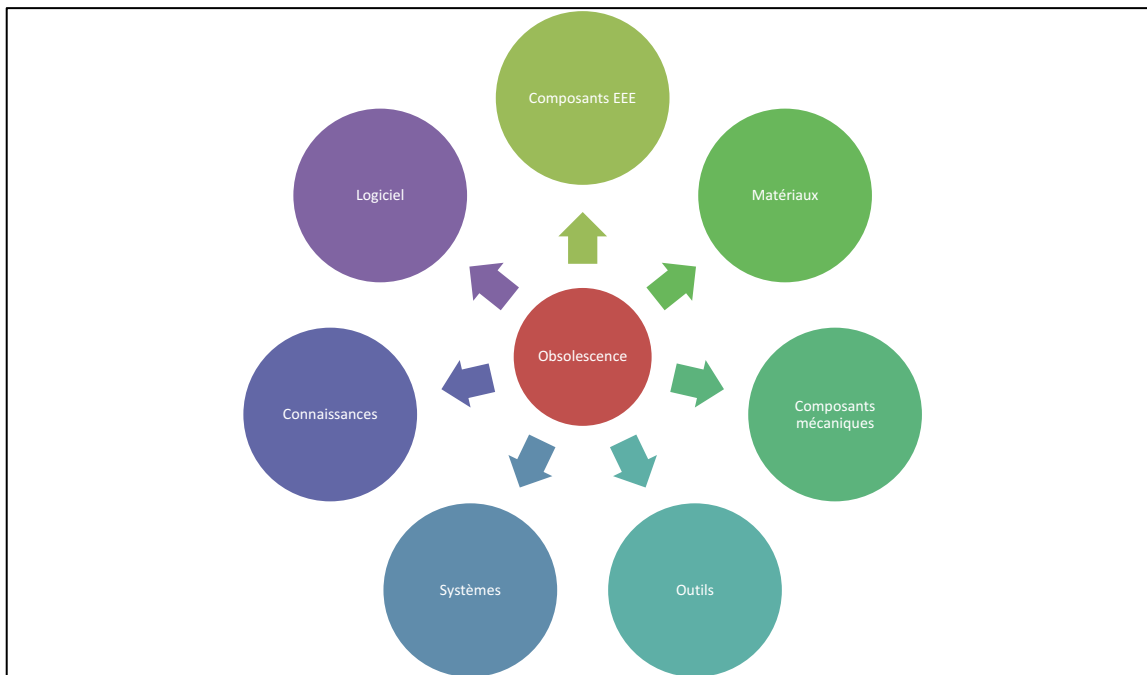


Figure 0.1 Vue holistique de l'obsolescence

La gestion de l'obsolescence technologique est devenue donc capitale dans les entreprises d'aujourd'hui. Praticiens comme académiques ont démontré un intérêt croissant à son impact économique, technologique et environnemental. En effet, la dernière décennie a marqué un changement réel de conscience des acteurs internationaux par rapport aux menaces causées par la désuétude des technologies sur les performances organisationnelles, le produit et le savoir

ainsi que son empreinte environnementale dans la génération des déchets d'équipements électriques et électroniques.

0.2 Motivation

L'effet immédiat de l'obsolescence est le coût global élevé de la maintenance des systèmes à longue durée de vie. Cela fait de la gestion de l'obsolescence une décision clé pour maintenir la rentabilité de ces systèmes. Elle est définie comme "l'ensemble des activités qui sont entreprises pour atténuer les effets de l'obsolescence" par (Bartels et al., 2012). Ces activités peuvent inclure la surveillance de l'obsolescence, le stockage, la conception pour l'obsolescence... Pour s'assurer qu'un plan de gestion des obsolescences s'améliore continuellement, (Bartels et al., 2012) proposent d'appliquer le cycle Plan-Do-Check-Act (PDCA). Le même processus est recommandé par la norme IEC 62402:2019 (IEC, 2019). Celle-ci préconise les étapes de processus de gestion de l'obsolescence comme suit :

- Mise en place d'une politique de gestion;
- Créer l'infrastructure et l'organisation nécessaires à la gestion de l'obsolescence;
- Développer un plan de gestion de l'obsolescence ou OMP (*Obsolescence Management Plan*);
- Développer des stratégies pour minimiser l'obsolescence durant la phase de conception de produit.
- Définir une approche de gestion de vieillissement des produits et systèmes;
- Choisir et implémenter des solutions durables pour résoudre les cas d'obsolescence;
- Mesurer, contrôler et améliorer les performances des activités de gestion de l'obsolescence.

Il est également recommandé d'assurer la gestion sur trois niveaux : réactif, proactif et stratégique. La gestion réactive traite le problème une fois que le composant est déjà devenu obsolète ou après avoir reçu la notification de changement de produit (PCN : *Product Change Notification*) ou la notification de discontinuation de produits (PDN : *Product Discontinuance Notification*) de son fabricant original (OCM : *Original Component Manufacturer*). Certaines

des stratégies réactives courantes sont l'achat d'un stock de fin de vie, l'achat d'un stock tampon, l'achat auprès du marché gris ou secondaire, trouver un remplacement identique, l'émulation et même la récupération.

Dans la gestion proactive, des mesures sont prises avant l'obsolescence effective. Ce niveau de gestion est relativement coûteux, mais encore plus rentable. Il consiste à appliquer une ou plusieurs méthodologies de prévision pour anticiper les dates d'obsolescence des différents composants d'un produit, analyser le risque d'obsolescence des éléments critiques dans une nomenclature BOM (*Bill of Materials*), puis prendre les mesures nécessaires pour la mitigation et l'éventuelle résolution de l'obsolescence.

La gestion stratégique est plus au niveau de l'optimisation de cycle de vie et l'élaboration d'analyses de rentabilisation à long terme pour le soutien des systèmes. Elle se base sur les données de cycle de vie de diverses technologies de composants, les détails de leurs logistiques, les prédictions technologiques et les tendances commerciales. Parmi les plus connues des méthodes de la gestion stratégique courantes, on retrouve l'indice de risque matériel (MRI) (Clay, Sykora, & Morrison, 2010) et la planification du rafraîchissement de la conception *Design Refresh* (Singh & Sandborn, 2006). Le développement d'un OMP (*Obsolescence Management Plan*) (Pobiak, Mazzuchi, & Sarkani, 2014) au niveau produit ou projet est aussi l'un des piliers des plans stratégiques.

À ce jour, les approches employées pour gérer ou atténuer l'obsolescence sont basées sur le facteur économique. Ces outils sont de nature quantitative et visent à minimiser le coût global. Cependant, l'un des défis de la gestion de l'obsolescence est qu'il existe de nombreux facteurs, autres que le coût, qui doivent être pris en compte lors du développement et la mise en place d'une stratégie de résolution de l'obsolescence (*ORS Obsolescence Resolution Strategy*). Certains de ces paramètres incluent des variables liées au marché, à la technologie ou encore au développement durable. Les concepts clés de cette analyse sont illustrés dans la Figure 0.2 où la problématique principale: la gestion de l'obsolescence, occupe le centre. Cette figure met en évidence les trois niveaux de gestion recommandés en y intégrant leurs différents piliers.

La flèche orange représente le flux de la gestion proactive qui se base sur les prévisions. La flèche rouge indique un flux sortant et donc la gestion réactive qui demande la sélection de la stratégie de résolution une fois la notification de discontinuité reçue. Cette décision a un impact sur les performances organisationnelles comme les coûts, les clients, les déchets mais aussi la chaîne logistique. Cet impact aurait pu être anticipé et réduit dans une approche stratégique représentée par le flux vert. Une gestion stratégique, telle que conçue par ces travaux et suivant les recommandations internationales, représente une couche supplémentaire à la gestion proactive en considérant mesurer la maturité de système de gestion mais aussi définir un plan de gestion de l'obsolescence. Le flux violet représente l'ensemble des données essentielles à la réussite de la gestion de l'obsolescence dans ses trois niveaux.

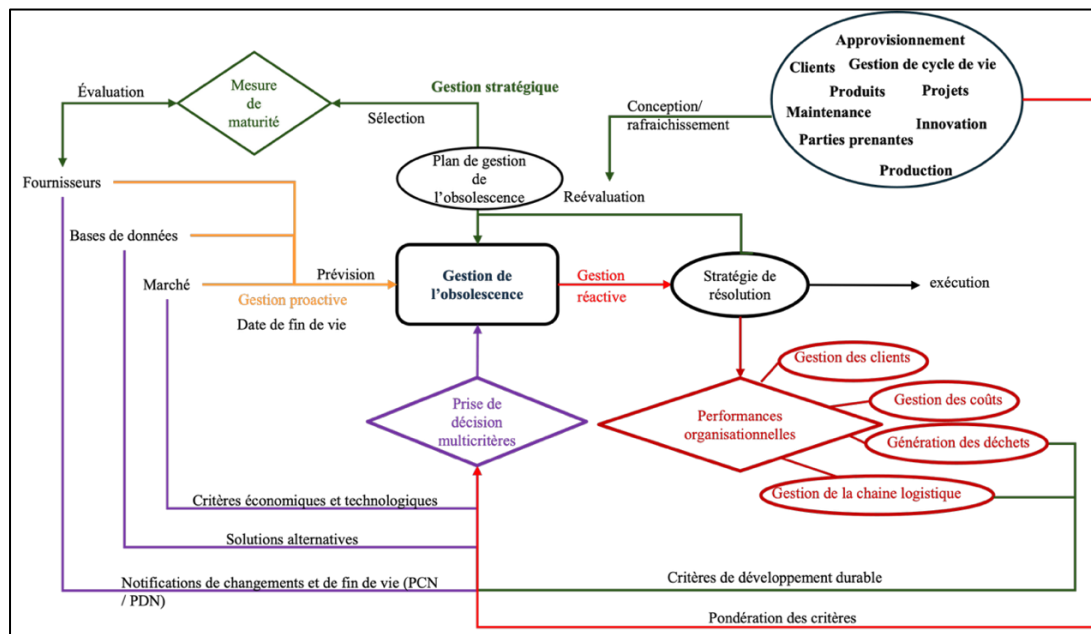


Figure 0.2 Illustration des concepts clés de la recherche et l'acheminement stratégique des travaux

0.3 Questions et objectifs de la recherche

Considérant que l'obsolescence est un fait réel et inévitable, l'objectif principal de cette recherche est d'étudier les moyens et les pratiques actuelles de sa gestion, identifier les

faiblesses et développer des méthodes permettant d'optimiser l'impact économique, technologique, social et environnemental sur le système manufacturier.

Dans un 1^{er} temps, après avoir observé la problématique de près, on s'est intéressé à l'impact de l'obsolescence sur l'environnement et les performances organisationnelles des fabricants d'équipements, étant donné qu'ils sont les premiers responsables à satisfaire les besoins de leurs clients en assurant le service après-vente. Cela est encore plus complexe pour les produits à cycle de vie long où le système est garanti être fonctionnel pour une très longue durée (50 ans pour les hélicoptères, par exemple), ce qui fait augmenter le risque d'obsolescence non pas uniquement des composants ou des sous-systèmes, mais aussi des technologies, des connaissances et de la technicité. La question sur l'environnement est la 1^{ère} question soulevée considérant le contenu des composants électroniques (terres rares et composants chimiques nocifs) et le nombre d'obsolescences observé. La composante de l'environnement ne peut être considérée indépendamment des autres performances organisationnelles garantissant la durabilité des systèmes. Cela nous mène à la formulation de la 1^{ère} question de recherche.

Question 1 : Quel est l'impact de l'obsolescence sur l'environnement et les performances organisationnelles?

L'obsolescence technologique est plus importante dans les composants électroniques non seulement pour les matériaux dangereux qui peuvent y être utilisés, mais aussi pour les terres rares qu'ils contiennent. L'étude de son impact dans les déchets EEE à l'échelle régionale et mondiale a motivé une direction de recherche exploratoire pour y mettre l'accent et ouvrir de nouvelles perspectives, telles que l'économie circulaire et la chaîne logistique verte.

Dans le cas où les politiques de gestion de l'obsolescence doivent être reconsidérées pour accommoder les contraintes environnementales ou législatives, nous devons avoir une idée des changements à apporter et de la direction à prendre. Pour cela, il est essentiel d'identifier et de comprendre l'impact de l'obsolescence sur les performances des systèmes manufacturiers, mais aussi d'évaluer le système de gestion en place et identifier ses faiblesses. Ainsi, nous

pouvons anticiper des méthodes de prise de décision en cas d'obsolescence pour atteindre de meilleures performances durables. Notre deuxième question de recherche est alors formulée comme suit :

Question 2 : Comment peut-on évaluer un système de gestion d'obsolescence et quelles solutions pour un cas d'obsolescence de processus?

Après avoir introduit le rôle de l'obsolescence dans les déchets EEE et son impact sur l'environnement et les performances organisationnelles, mesuré le niveau de maturité des systèmes de gestion, la question qui s'est posée directement est par rapport à l'exploitation de ces extrants pour prendre des décisions durables. Nous formulons ainsi notre 3^{ème} question de recherche.

Question 3 : Comment choisir l'approche de résolution la plus durable en cas d'obsolescence?

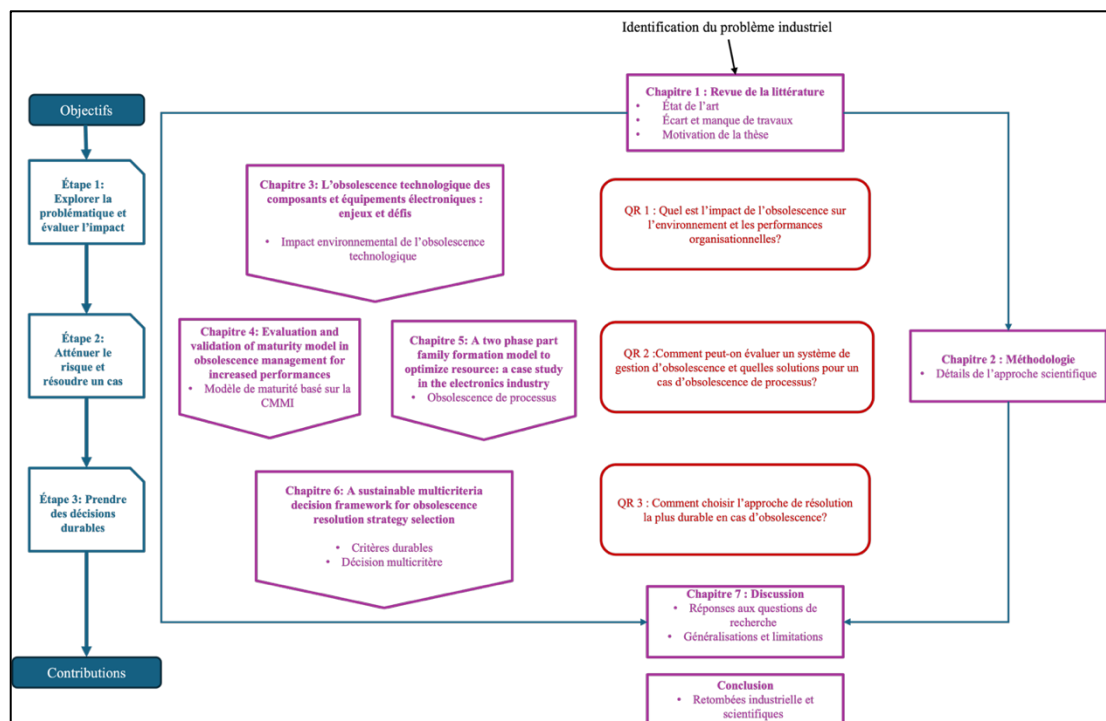


Figure 0.3 Vue détaillée sur l'organisation de la thèse

La durabilité exige l'intégration simultanée des objectifs économiques, environnementaux et sociaux qui affectent les décisions, en particulier celles de sélectionner la stratégie de résolution d'un cas d'obsolescence. À partir des relations établies, on peut identifier les forces et les faiblesses des systèmes de gestion. Cela nous aiderait à développer un modèle de prise de décision capable d'introduire des objectifs durables, de transformer les politiques environnementales en critères d'évaluation et de réagir en situations menaçantes. Dans ces circonstances, les méthodes d'aide à la décision multicritère pourraient aider à considérer les différents critères économiques, environnementaux et sociaux impliquant directement la chaîne logistique et les politiques d'approvisionnement.

0.4 Liste des contributions

Les travaux entamés dans cette thèse de doctorat servent à répondre aux questions de recherche ainsi qu'au besoin industriel soulevé par le projet de recherche. Une vue détaillée liant les étapes, les questions de recherche et les chapitres de cette thèse sont décrits dans la Figure 0.3 ainsi que le Tableau 0.1. En effet, l'article décrit dans le chapitre 3 «*Obsolescence technologique des composants et équipements électroniques : enjeux et défis* » paru dans *Techniques de l'ingénieur* ainsi que l'article de conférence inséré en ANNEXE I : «*The impact of parts obsolescence on organization's performances: a case study in the aeronautic industry* » présenté à la conférence *MOSIM*, ont permis de répondre à la 1^{ère} question de recherche par l'analyse et l'évaluation de l'impact de l'obsolescence sur l'environnement et sur les performances organisationnelles. L'extrait de ces articles a servi d'entrée dans le modèle de maturité en s'appuyant sur le fait que la maturité d'un système de gestion d'obsolescence est basée en partie sur l'impact du risque encouru sur les performances économiques, environnementales et sociales. L'article de conférence, inséré dans le chapitre 4 : «*Evaluation and validation of a maturity model in obsolescence management for increased performance* » présenté à l'*International Annual Conference of the American Society for Engineering Management, ASEM* ainsi que la résolution d'un cas concret d'obsolescence de processus inséré dans le chapitre 5 : «*A two-phase part family formation model to optimize resource planning: a case study in the electronics industry* » publié dans *Operational Research*, ont

permis de répondre à la 2^{ème} question de recherche. Les extraits des réponses aux questions de recherche 1 et 2 ont servi comme critères d'évaluation pour prise de décision durable en gestion de l'obsolescence, permettant ainsi de minimiser son impact et améliorer les performances du système manufacturier. L'article de revue présenté dans le chapitre 6 : «*A sustainable multicriteria decision framework for obsolescence resolution strategy selection*» publié dans la revue *Sustainability*, présente le modèle de prise de décision durable appliqué dans un contexte industriel. Celui-là a été, dans une version réduite, présenté dans l'*International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. Il se trouve en ANNEXE II.

Tableau 0.1 Liens entre les objectifs de la thèse et les publications scientifiques

Objectif de la thèse	Modéliser et optimiser la gestion de l'obsolescence pour des performances accrues et une chaîne logistique robuste, résiliente et verte.		
Objectifs spécifiques	Quel est l'impact de l'obsolescence sur l'environnement et les performances organisationnelles?	Comment peut-on évaluer un système de gestion d'obsolescence et quelles solutions pour un cas d'obsolescence de processus?	Comment choisir l'approche de résolution la plus durable en cas d'obsolescence?
Méthodologies utilisés	Analyse préliminaire de l'impact de l'obsolescence dans les déchets EEE Et Étude de cas exploratoire	Développement d'un modèle de mesure de maturité et Résolution d'un cas d'obsolescence de processus	Développement d'un modèle multicritère pour la prise de décision
Article répondant à chaque objectif	Chapitre 3 et Annexe I	Chapitre 4 et 5	Chapitre 6

0.5 Organisation de la thèse

Cette thèse est organisée en sept chapitres, le 1^{er} chapitre présente une revue de la littérature de l'obsolescence technologique. La définition et les niveaux de sa gestion sont détaillés ainsi que l'état de l'art des concepts clés de la recherche. Nous consacrons le 2^{ème} chapitre à l'explication et la justification des différentes méthodologies utilisées et le cheminement logique et scientifique de ces travaux. Les chapitres 3, 4, 5 et 6 sont consacrés à chacun des articles revus par les pairs, dont trois journaux et une conférence, fruits de ces années de recherche. L'avant-dernier chapitre, numéro 7, porte une discussion des travaux, des contributions et les possibles voies d'amélioration, mais aussi les recherches futures. La thèse est clôturée par une conclusion générale valorisant l'ensemble des contributions et proposant des recommandations pour les futurs travaux.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre vise à élaborer un examen de la littérature des travaux en gestion de l'obsolescence technologique et offre une formulation détaillée de diverses notions théoriques ainsi que les problématiques qui lui y sont associées. Nous présentons dans un premier temps les fondamentaux de la gestion de l'obsolescence, son historique, sa définition et ses approches de gestion. Nous parcourons ensuite l'état de l'art actualisé, une première revue a été faite au début de la thèse et une vers sa fin. Nous définissons au fur et à mesure les concepts clés employés. Dans un dernier temps, nous examinons l'ensemble des travaux et situons les nôtres.

1.1 Les fondamentaux de la gestion de l'obsolescence

1.1.1 L'histoire de l'obsolescence technologique

Le concept associé à l'obsolescence a vu le jour au début des années 70 dans un contexte technologique (Bartels et al., 2012). Cela a commencé dans le jeu de train « *railway game* », où le marché impose la stratégie du fournisseur unique. Ce modèle a créé plusieurs problèmes, parmi eux, l'auteur a identifié l'obsolescence (Lukasiewicz, 1976), initialement nommée DMSMS par le département de la défense américaine *DoD*. Quelques années plus tard, avec la complication de cette problématique, un premier guide de gestion a été élaboré pour le P-3 Orion, par ARINC (*Aeronautical Radio Incorporated*) en 1984 (Kuehn, 1984). Le grand choc qui a mis réellement l'obsolescence sous les radars a été le retrait des semi-conducteurs militaires de Motorola et Intel au début des années 90, qui a perturbé le programme militaire des États-Unis (Bartels et al., 2012). En effet, le problème revient au fait que dans les années 60 et 70, le secteur militaire définit et contrôle la conception, les spécifications et les requis de ses systèmes, comme ils y sont développés exclusivement. Simplement, dans les années 80, l'introduction des composants électroniques et la fin de la guerre froide ont mis la pression pour limiter les budgets dans le militaire (Singh & Sandborn, 2006). Comme conséquence, dans les années suivantes, les manufacturiers ont migré du marché à bas à haut volume et ont

concentré leurs efforts dans du commerce plus profitable (Hitt & Schmidt, 1998; Redling, 2004). La conséquence directe de ce changement a été l'avènement de l'obsolescence technologique dans le secteur militaire et le secteur aérospatial (Torresen & Lovland, 2007).

1.1.2 Définition de l'obsolescence

L'obsolescence est définie de plusieurs manières dans la littérature. Cette notion, étant relativement nouvelle dans la recherche scientifique, faisait l'objet de plusieurs définitions différenciées soit par les causes ou par les conséquences du phénomène. Il est, donc, crucial d'établir une définition claire, complète et précise.

Linguistiquement, le mot « obsolescence » est tiré du terme latin « obsolescence », qui se traduit par « n'est plus utilisable ou démodé ». L'adjectif associé « obsolète » vient du terme « obsoletus », qui signifie « usé ». Scientifiquement, elle est définie comme la perte ou la perte imminente des manufacturiers originaux des composants, des fournisseurs des composants ou de la matière première (Feldman & Sandborn, 2007; Livingston, 2007; Tomczykowski, 2003). Dans la littérature, on trouve une distinction entre l'obsolescence et la discontinuité (Pecht & Das, 2000). La discontinuité arrive à un composant ou un niveau manufacturier spécifique (composant, unité ou module ou système) quant à l'obsolescence, elle arrive à un niveau technologique (Rojo, Roy et Shehab, 2010). La perte des manufacturiers originaux des composants, quant à elle, est définie par la fin de production et/ou du support des composants dont on a besoin pour fabriquer et/ou assurer le support d'un système qui deviennent indisponibles avant que la demande de système soit satisfaite (Zheng et al. 2015). Une définition plus réaliste de l'obsolescence est quand un composant ou une technologie nécessaire pour la production ou la maintenance d'un produit ou un système est indisponible, soit dans le stock, soit chez le fabricant (Bartels et al., 2012). On couvre ainsi à la fois les deux notions d'obsolescence et de discontinuité.

L'obsolescence est le statut attribué à un composant lorsqu'il n'est plus disponible auprès de son fabricant d'origine. Elle peut avoir de nombreuses causes, y compris la non-disponibilité

des matériaux nécessaires à la fabrication, la diminution de la demande, la duplication des gammes de produits, ou aussi les problèmes de gestion. Le problème de l'obsolescence est plus répandu dans l'industrie électronique, dans laquelle les durées de vie d'approvisionnement pour les pièces microélectroniques sont souvent beaucoup plus courtes que la durée de fabrication et les cycles de vie des produits ou des systèmes qui les utilisent. Cependant, l'obsolescence s'étend au-delà des composants électroniques à d'autres éléments, tels que les matériaux, les textiles et les parties mécaniques. Il a été démontré qu'elle touche également aux logiciels, spécifications, normes, processus et ressources immatérielles, tels que les compétences humaines.

La première cause conduisant à l'obsolescence est le développement technologique rapide, qui rend un système ou un composant inutilisable pour des raisons techniques, économiques ou juridiques (Feldman & Sandborn, 2007). La 2^{ème} cause est la disparition du fabricant de composants d'origine (OCM) ou d'équipement d'origine (OEM) du marché pour diverses raisons (Atterbury, 2005). Ce dernier type d'obsolescence est dénoté DMSMS. L'abréviation *DMSMS* est la traduction directe de la langue anglaise. Ce terme a été utilisé par l'industrie de la défense américaine pour se référer à l'obsolescence des composants électroniques et de la matière première. Aujourd'hui, c'est un terme faisant référence à l'obsolescence technologique en général dans sa dimension logistique. La 3^{ème} cause, est le fait que l'OCM ou l'OEM n'est plus disposé à continuer à produire un composant ou équipement pour des raisons économiques (généralement précipitées par une baisse de la demande) (Atterbury, 2005). Finalement, la 4^{ème} cause est le processus de vieillissement chimique ou physique qui peut détruire les composants ou rendre impossible l'utilisation du stock existant. D'autres auteurs définissent l'obsolescence technologique comme étant le résultat de la variance des cycles de vie des systèmes et les composants électroniques qui les composent. Cette définition convient surtout aux systèmes à long cycle de vie, tels que la défense, l'aérospatiale, le nucléaire ou, dans une moindre mesure, l'automobile.

Plusieurs années plus tard, la norme IEC 62402 (IEC, 2019) a défini le terme d'une façon précise permettant ainsi, dans ces travaux ou dans la littérature récente, de définir

l'obsolescence comme 'la transition de l'état de disponibilité à l'état d'indisponibilité d'une entité auprès de son fabricant conformément à la spécification d'origine'. Cet état d'indisponibilité peut s'avérer involontaire ou déjà programmé.

1.1.3 Les approches de gestion de l'obsolescence

Tout au long de ces travaux de recherche, seule l'obsolescence non programmée ou involontaire est considérée. En effet, l'obsolescence programmée est une stratégie d'affaire dans laquelle l'obsolescence d'un produit est planifiée depuis sa conception afin d'aider les fabricants à générer de gros volumes de ventes à long terme par la réduction du temps entre deux achats. Malgré l'importance de cette dernière et son impact sur le développement durable, sa gestion ne fait pas l'objet de ces travaux.

Le sujet de ce travail concerne donc l'obsolescence non programmée où ni le client ni le fabricant ne veulent nécessairement changer le produit ou le système. L'obsolescence involontaire peut être catégorisée comme suit (Sandborn, 2007) :

- **Logistique** : incapacité de se procurer les composants, le matériel, la technologie de fabrication ou logiciels pour fabriquer ou assurer la maintenance d'un produit.
- **Fonctionnelle** : le produit ou son sous-système restent opérationnels, fabriqués ou même supportés, mais avec des changements dans les spécifications, donc la fonctionnalité du produit, ses performances ou sa fiabilité deviennent obsolètes. Pour des systèmes complexes comme les systèmes avioniques, l'obsolescence fonctionnelle d'un sous-système est souvent causée par des changements faits dans d'autres parties du système.
- **Technologique** : quand des composants plus avancés technologiquement sont introduits, le stock d'anciennes versions reste toujours disponible pour fabriquer et faire la maintenance des produits, mais ça devient un problème d'obsolescence technologique quand les fournisseurs des anciennes versions n'assurent plus leur approvisionnement ou leur maintenance et le stock n'est pas suffisant pour assurer le support du système tout au long son cycle de vie.

- **Amélioration des fonctions imposée par l'obsolescence** (FIDO : *Functionality Improvement Dominated Obsolescence*): les fabricants ne sont plus compétitifs à moins qu'ils fassent évoluer leur produit. Ils sont alors forcés par le marché à procéder au changement.

Des termes tels que l'obsolescence et obsolète sont déjà utilisés par certaines entreprises lorsqu'ils fournissent une notification de modification de produit (PCN) ou de fin de vie (EoL) ou de discontinuité (PDN). Dans de tels cas, le composant peut parfois être encore disponible pour un temps limité ; c'est-à-dire que les clients peuvent avoir la possibilité de passer une dernière commande des pièces et de stocker suffisamment pour répondre aux exigences de durée de vie prévues de leurs systèmes. Ces actions sont appelées achats de fin de vie ou dernier achat (LTB *Last Time Buy*) ou achats relais (BB *Bridge Buy*).

Le stockage est l'une des solutions à l'obsolescence, mais n'en est pas la seule due à son coût et sa faisabilité. Plusieurs autres solutions sont possibles dépendamment de niveau de gestion : réactive, proactive ou/et stratégique.

1.1.3.1 La gestion réactive

La gestion réactive de l'obsolescence est une approche visant à gérer et à atténuer à court terme le risque d'obsolescence en garantissant l'approvisionnement en composants jusqu'à ce que les engagements en matière de reconception ou de support aient été remplis. En fonction des circonstances spécifiques et des conditions préalables, telles que la durée de vie restante, le volume et la complexité, il existe plusieurs outils qu'une organisation confrontée à l'obsolescence peut utiliser. La gestion au niveau réactif doit être appliquée immédiatement, une fois une notification d'obsolescence reçue, pour résoudre le problème afin de minimiser la pénurie d'approvisionnement ou la perturbation opérationnelle.

La reconception est une approche de la gestion réactive qui implique le développement ou la révision d'un composant obsolète pour mettre fin à son utilisation (Bartels et al., 2012; Huang

et al., 2019). L'objectif principal est d'améliorer les performances, la fiabilité, le support ou la robustesse de conception des composants, en utilisant des composants plus récents. Cet objectif pourrait être atteint en appliquant une conception modulaire, ce qui permettrait d'utiliser davantage de composants standard (Wilkinson, 2015; Zaabar, Arango-Miranda, Beauregard, & Paquet, 2021). Cependant, cette option est généralement la plus onéreuse et doit être envisagée en dernier recours si des mises à niveau des fonctionnalités sont nécessaires. La reconception est la plus durable des approches réactives décrites. En outre, elle pourrait être techniquement et économiquement viable lorsqu'elle est choisie pour prolonger le cycle de vie du système ou du produit, augmentant ainsi les bénéfices. Les produits nécessitant une reconception sont inévitables pour les systèmes à longue durée de vie, et certains d'entre eux font généralement l'objet de reconceptions répétitives tout au long de leur durée de vie, en raison du décalage entre la durée de vie et les exigences de service des composants individuels. Par conséquent, les entreprises fournissant ces types de produits doivent disposer d'une stratégie de reconception claire pour gérer de manière efficace et rentable leurs besoins.

1.1.3.2 La gestion proactive

La gestion proactive de l'obsolescence est le niveau de gestion dans lequel les composants et leurs technologies non désuètes sont suivis et gérés de manière proactive avant que les problèmes liés à l'obsolescence ne surviennent (Jenab, Noori, Weinsier, & Khoury, 2014; Zheng et al., 2015). L'objectif de la gestion proactive est d'atténuer de manière proactive les risques d'obsolescence qui pourraient conduire à l'indisponibilité des composants, à des arrêts de production et à des reconceptions coûteuses, etc. La surveillance et le suivi des informations sur le cycle de vie des composants font partie de la prévision de l'obsolescence, qui est le cœur de la gestion proactive. Outre la prévision de l'obsolescence, la gestion proactive doit également inclure des processus de révision et de mise à jour du statut d'obsolescence (Sandborn, 2008).

Les experts recommandent le passage de mesures réactives à des mesures proactives dans la gestion de l'obsolescence pour rester compétitifs. Dans ce cas, il est très important de

comprendre que les pièces, les composants et les produits différents nécessitent des niveaux de proactivité différents. Celui-ci doit être évalué sur la base d'une estimation initiale des risques, en évaluant la probabilité d'obsolescence et son impact (Zaabar, Beauregard, & Paquet, 2017). Par exemple, si l'impact économique est faible (en raison d'un remplacement FFF- Forme-Format-Fonctionnalité), il peut être conseillé de gérer l'obsolescence de manière seulement réactive. Si l'impact est conséquent, la nécessité d'être proactif est plus forte. Lorsqu'une pièce, un composant ou un produit a à la fois un impact élevé et une forte probabilité d'obsolescence, il peut être classé comme critique et les mesures proactives doivent être privilégiées.

L'un des facteurs clé, mais limitant dans la gestion proactive et la prévision d'obsolescence est l'ensemble des ressources dédiées dans une entreprise à cette activité (Bartels et al., 2012). Étant donné qu'une entreprise ne pourra disposer des ressources nécessaires pour gérer de manière proactive tous les composants et produits, il est nécessaire d'identifier et de hiérarchiser les composants critiques. La criticité d'un composant est basée sur le risque de devenir obsolète, la disponibilité après l'obsolescence et son impact lorsqu'il deviendra obsolète. Afin de concentrer les ressources et de décider du niveau de proactivité nécessaire, il faut définir des responsabilités et un processus pour le modèle de gestion proactive. En plus de la rareté d'expérience, en général, en gestion d'obsolescence, il y a un manque de collaboration entre les équipes de la gestion d'obsolescence d'une part et les autres structures de l'entreprise, telles que la gestion des projets, la planification, le suivi et le contrôle de la qualité. Les experts recommandent la participation à un conseil de gestion de l'obsolescence de différentes fonctions et différents départements dans le processus proactif de gestion de l'obsolescence afin de fournir des connaissances expertes dans différents domaines.

Prévoir l'obsolescence

La prévision de l'obsolescence vise à informer sur la disponibilité future, les alternatives possibles et l'approvisionnement des composants. L'analyse des risques fournit des informations sur les composants, telles que la prévision de la disponibilité et de la date

d'obsolescence, l'identification des risques, et donne un état de santé global du système. Bien que l'analyse du risque d'obsolescence et la prévision de l'obsolescence soient importantes tout au long du cycle de vie d'un produit, une analyse initiale est vitale pour éviter l'inclusion de composants obsolètes ou bientôt obsolètes dans la conception finale (Bartels et al., 2012). La gestion proactive et l'analyse des risques d'obsolescence doivent commencer tôt dans la phase de conception, avant que le processus de qualification n'ait commencé, afin d'éviter les coûts inutiles liés à la requalification. Lors de la prévision de l'obsolescence, la technique la plus courante dans les entreprises consiste à utiliser les nomenclatures des produits afin d'éviter la sélection de composants obsolètes présentant un risque imminent d'obsolescence (Zheng et al., 2013). La gestion des nomenclatures peut se faire de plusieurs façons, mais les approches communes sont l'utilisation d'outils de gestion de cycles de vie PLM et de bases de données. De nombreuses compagnies gérant l'obsolescence de manière proactive mettent en œuvre des outils commerciaux pour surveiller les nomenclatures et fournir des analyses de pérennité, tels que Silicon Expert (www.siliconexpert.com), Z2 data (www.z2data.com), IHS accuris (www.accuristech.com)...etc. De même, les bases de données en ligne peuvent être utilisées de manière similaire en téléchargeant des listes de nomenclatures et en recevant des informations pertinentes sur l'obsolescence. Des boîtes de conseil proposent aujourd'hui des solutions de gestion de l'obsolescence de A à Z.

Les résultats de l'analyse du risque d'obsolescence doivent être résumés et compilés dans un indice de risque. Parmi les indices, on trouve l'indice du risque matériel IRM (Bartels et al., 2012; Sandborn, Herald, Houston, & Singh, 2003). Cet indice est un score décrivant le niveau de risque d'obsolescence pour chaque composant de la nomenclature. En général, l'indice classe un composant dans la catégorie rouge s'il est obsolète ou recommandé pour une reconception, orange si la disponibilité future ne répond pas aux exigences ou s'il s'agit d'une source unique, bleu si aucune information n'est disponible et vert si aucun risque n'est identifié (Bartels et al., 2012). Pour assurer une gestion proactive efficace, les données issues des prévisions et de l'analyse des risques doivent être mises à jour fréquemment. Réaliser régulièrement l'analyse des risques et les prévisions équivaut à suivre la disponibilité des composants. La fréquence du suivi de la disponibilité des composants dépend du besoin de

surveillance. Si un produit ou une pièce comprend des composants critiques, l'analyse des risques et les prévisions d'obsolescence doivent être effectuées plus fréquemment. Si un produit ou une pièce ne comporte pas de composants critiques, l'analyse des risques et la prévision de l'obsolescence peuvent être effectuées moins souvent.

1.1.3.3 La gestion stratégique

La gestion stratégique de l'obsolescence est utilisée en plus de la gestion réactive et proactive et implique la planification et l'optimisation de l'utilisation de différentes approches d'atténuation de l'obsolescence pour minimiser le coût du cycle de vie tout en répondant aux exigences fonctionnelles fixées (Meng, Thornberg, & Olsson, 2014; Nelson & Sandborn, 2012). Ce niveau de gestion consiste à utiliser les données disponibles sur les technologies et les prévisions d'obsolescence ainsi que les données de la chaîne d'approvisionnement pour permettre la planification stratégique et l'optimisation du cycle de vie. L'une des conditions préalables pour réussir à atténuer l'obsolescence est de développer des plans et des processus efficaces tout au long du cycle de vie dans la conception, la production et le support après-vente.

La gestion réactive est un outil important pour gérer une situation d'obsolescence non planifiée et est indispensable dans une organisation. Cependant, elle peut s'avérer très coûteuse sur la durée de vie d'un produit, sans compter le risque de ne pas pouvoir gérer l'indisponibilité des composants. Ainsi, la gestion stratégique est nécessaire pour éviter l'obsolescence dès la conception. Le moyen le plus efficace d'atténuer l'obsolescence est de la prévoir dès la première phase de conception et d'empêcher ainsi l'effet de la cause plus tard dans le cycle de vie. En outre, l'accent est mis sur la prise en compte des changements rapides de composants afin de rationaliser les processus de conception et de production pour limiter efficacement l'obsolescence et les coûts associés. L'approche stratégique s'articule autour de l'élaboration d'une analyse de rentabilité de l'obsolescence où la gestion de projet est appliquée pour faciliter le processus.

1.2 État de l'art

La recherche bibliographique dans cette thèse a été actualisée à plusieurs reprises durant ces années de thèse. Elle se base sur un ensemble de paramètres et suit le processus décrit dans la Figure 1.1. Les requêtes de recherche utilisées sont une combinaison des mots suivants : obsolescence, management, forecasting, decision making, sustainability, waste, environment. Le moteur de recherche Google Scholar est consulté en complément afin de nous assurer que nous repérons les articles les plus recherchés.

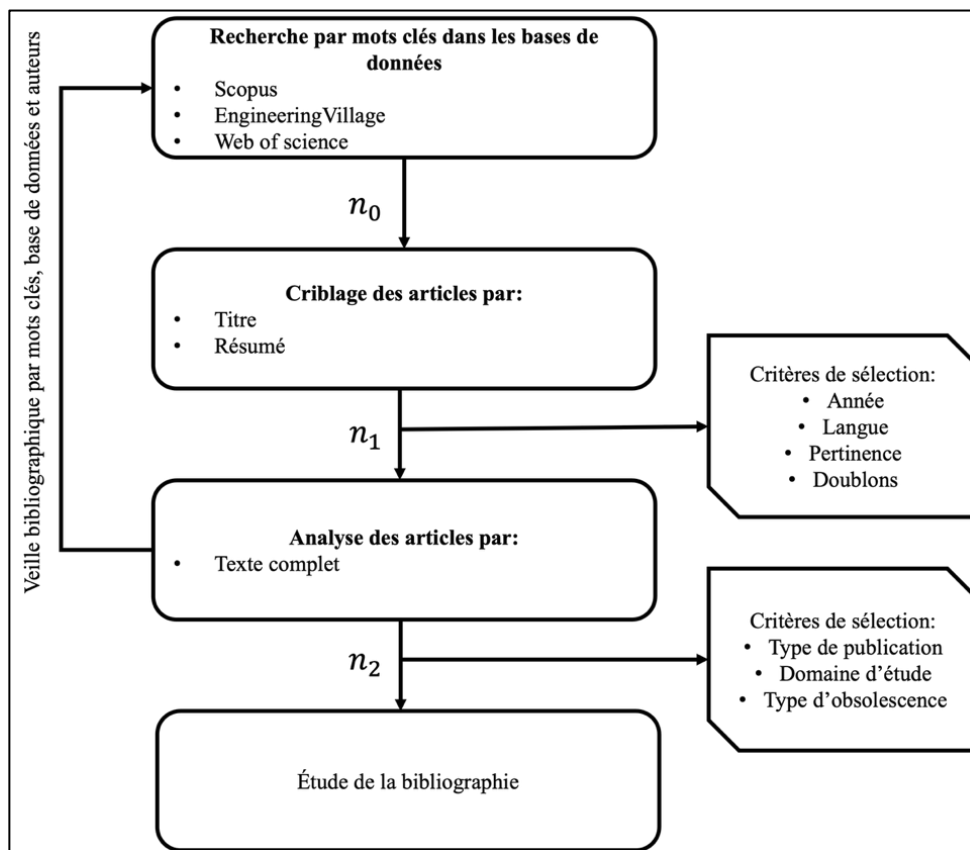


Figure 1.1 Processus suivi de la recherche et la veille bibliographique

La recherche bibliographique la plus récente (Mai 2025) a pour requête `obsole* and manage*` a généré 7376 articles. Le choix de ces mots clés est justifié par notre volonté de couvrir tous les articles en lien avec la gestion de l'obsolescence en tant que sujet de recherche principal ou

secondaire. Un premier filtre a été appliqué, après suppression des doublons, sur l'année (2020-2025), la langue (français et anglais) et la pertinence des titres et des résumés. La pertinence des titres et des résumés se base sur leur contenu, les articles sélectionnés doivent traiter l'obsolescence technologique. À cette étape, 521 articles ont été retenus. Un deuxième filtre a suivi en sélectionnant uniquement les articles de revue comme type de publication, dans un domaine technologique ou scientifique et considérant l'obsolescence technologique non programmée. L'analyse de texte complet en complément a retenu 36 articles. C'est l'ensemble des articles de revue scientifiques, uniques, rédigés en anglais ou français, au cours des cinq dernières années traitant la problématique de l'obsolescence technologique non programmée.

À l'aide du logiciel VOSviewer, un réseau d'occurrences (Figure 1.2) a été généré pour visualiser l'ensemble des domaines et disciplines de la gestion de l'obsolescence. Partant de la première catégorie qui concerne la production et la gestion de changement guidés par la disponibilité des composants électroniques (réseau en bleu), le réseau se ramifie sur quatre autres grandes catégories. La deuxième catégorie (réseau vert) couvre les notions de la technologie, le développement. La troisième catégorie (réseau rouge) regroupe les notions de conception et de développement durable. La gestion des données et la prédiction, représentés par le réseau jaune, représentent la quatrième catégorie qui avoisine la cinquième catégorie contenant les termes reliés au marché comme la demande, l'inventaire et le profit.

Dans ce réseau complexe, on trouve les trois domaines clés sujets de cette thèse : component obsolescence, management et sustainability. L'idée principale étant d'explorer, atténuer et gérer l'obsolescence d'une manière durable. L'ensemble des articles étudiés ont enrichi l'état de l'art présenté durant ces années de doctorat.

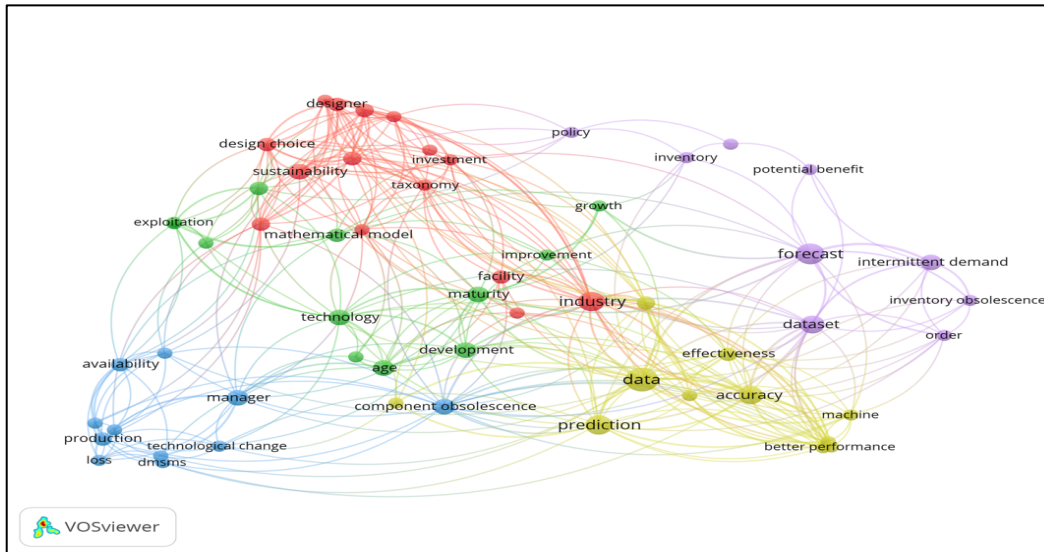


Figure 1.2 Réseaux d'occurrences de mot clés généré dans l'analyse bibliographique par VOSviewer

Ces travaux cherchent à construire un cadre durable pour soutenir la prise de décision dans la gestion de l'obsolescence, que ce soit au niveau réactif, proactif ou stratégique dès la conception et jusqu'à la fin de vie du système. L'étude est principalement liée à trois courants de recherche dans la littérature : la gestion de l'obsolescence, en particulier la sélection de la stratégie de résolution/atténuation, les performances des systèmes manufacturiers et le développement durable. Ces trois termes ont été bien identifiés dans le réseau d'occurrences dans les catégories : bleue, verte et rouge.

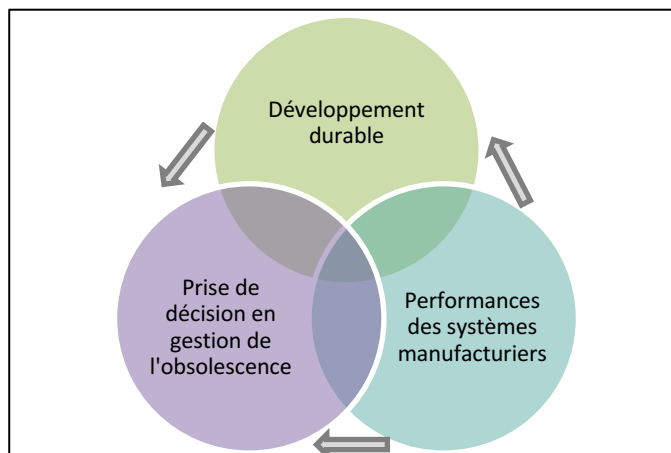


Figure 1.3 Les trois axes de recherche de l'étude

1.2.1 La gestion de l'obsolescence technologique

L'obsolescence des composants continue à gagner de l'étendue. Elle a atteint, par exemple, 70% dans certaines entreprises minières en 2022 (Zabaikin, Lunkin, & Lunkin, 2022). Son impact sur les performances des systèmes et des organisations est de plus en plus étudié. Ren et al., 2025 ont examiné le cas où de nombreuses unités embarquées (OBU : *On Board Unit*) sont confrontées à l'obsolescence technologique dans la gestion de trafic. Cela a entraîné une baisse de leurs performances et une fragilité accrue, les rendant inadaptées aux exigences modernes de la gestion du trafic. D'autres études soulignent l'importance du risque d'obsolescence dans la gestion des stocks (Tiwari, Khedlekar, Tiwari, Kumar, & Khedlekar, 2024) ainsi que dans la gestion de la chaîne logistique (Schumm, Ralston, & Schwieterman, 2024). Ce dernier affirme que l'obsolescence des intrants de fabrication critiques constitue un risque majeur pour la chaîne d'approvisionnement et représente un problème croissant pour les professionnels des achats, qui doit être géré de manière appropriée afin de répondre aux besoins des clients de façon rentable.

L'atténuation de l'obsolescence est une nouvelle source d'avantage concurrentiel (Ward & Osiyevskyy, 2025). Sa mitigation doit commencer très tôt dès les premières étapes de conception des produits. Dans le bâtiment, Staehr, Stevik, & Houck, 2025 soulignent l'importance de l'adaptabilité face à l'obsolescence. Que ce soit dans le domaine de

l'électronique ou du bâtiment, la gestion de l'obsolescence demeure essentielle et repose sur de nombreuses bonnes pratiques, telles que l'adaptabilité de la conception et la prévision de l'obsolescence. Une solution pour faciliter la prise de décision à long terme et réduire l'obsolescence est essentielle en promouvant une approche par cycle de vie. Bullick, 2021 indique que le choix de composants durables dès les premières étapes de la conception a un impact considérable sur leur durée de vie. L'obsolescence représente, pour lui, un risque majeur et souvent négligé lors de la sélection de composants d'automatisation. Pour les systèmes sensibles et complexes, il est parfois inévitable de développer des dispositifs spécifiques pour mitiger l'obsolescence, selon un cahier des charges particulier, afin de répondre aux besoins spécifiques de chaque système. C'est le cas, par exemple, des capteurs de radioprotection développés (Boukabache et al., 2025).

Sierra-Fontalvo, Ruiz-Pastor, Gonzalez-Quiroga, & Mesa, 2024 ont élaboré une taxonomie de 21 attributs de conception de produits influençant différents types d'obsolescence, afin de combler le manque de recherches sur le lien entre conception de produits et obsolescence. Celle-là n'affecte pas seulement les consommateurs, qui peuvent se retrouver avec des appareils rapidement obsolètes, mais pose également un dilemme aux concepteurs et aux fabricants, qui doivent concilier innovation constante, durabilité et longévité des produits. Dans ce contexte dynamique, il est essentiel de comprendre comment les attributs de conception influencent l'obsolescence et comment cette relation peut contribuer à la création de produits plus durables et résilients.

1.2.2 L'obsolescence et environnement

L'évolution rapide des produits dans l'industrie électronique entraîne également une durée de vie relativement courte pour les produits existants, les rendant obsolètes peu après leur mise sur le marché. Ils contiennent souvent des minéraux toxiques, tels que le plomb, le mercure, le cadmium et l'arsenic. Lors de la mise au rebut des produits électroniques en fin de vie, les minéraux dangereux qu'ils contiennent peuvent se libérer dans l'environnement, provoquant des effets importants et irréversibles sur la santé et une pollution environnementale.

L'obsolescence est un phénomène profondément lié à la production de déchets, depuis l'échelle des petits appareils technologiques jusqu'à celle des déchets urbains.

Pour remédier à ce problème, plusieurs études font les liens avec le développement durable et l'environnement. Chenavaz, Dimitrov, Figge, & Schlosser, 2025 ont étudié l'intersection entre l'économie circulaire et l'obsolescence technologique. Il confirme que cette intersection est essentielle à la compréhension de la consommation durable et de l'impact de l'innovation sur la gestion du cycle de vie des produits. Xiao, Shi, & Wang, 2025 ont pris en compte l'obsolescence des produits lors de la conception d'une chaîne d'approvisionnement durable en boucle fermée (*SCLSC : Sustainable Closed-Loop Supply Chain*) pour l'industrie de la fabrication d'appareils électroménagers. Cette initiative vise à optimiser la réduction des coûts totaux, la minimisation des émissions de carbone et la maximisation des bénéfices sociaux. Werner-Lewandowska, Golinska-Dawson, & Mierzwiak, 2025 ont utilisé un DEMATEL gris multicritères flexible (*Decision Experimentation and Evaluation Laboratory*) pour identifier efficacement les principaux facilitateurs et obstacles à la construction de la chaîne d'approvisionnement circulaire en mettant l'accent sur la remise à neuf.

Dans le paysage en constante évolution des appareils électroniques, la durée de vie opérationnelle des équipements électroniques et électriques a considérablement diminué. Cette obsolescence contribue à une augmentation significative des déchets électroniques (Saha, Basu, Singh, Singhal, & Pimple, 2025). L'étude de cet impact environnemental et son intégration dans la gestion de l'obsolescence sont cruciales.

1.2.3 Le processus de gestion de l'obsolescence et la mesure de maturité

Rojo et al., 2012 ont mené une étude qualitative afin de développer un cadre d'évaluation des capacités de gestion de l'obsolescence pour le ministère de la Défense britannique. Cet outil, appelé TOMCAT (*Total Obsolescence Management Capability Assessment Tool*), vise principalement à aider le ministère à connaître les capacités de ses contractants en matière de gestion de l'obsolescence et à les accompagner dans leur amélioration. Un ensemble de 25

indicateurs, répartis en huit éléments clés (gouvernance de la gestion de l'obsolescence, fournisseur, conception pour l'obsolescence, évaluation des risques, suivi de l'obsolescence, communication et processus de résolution de l'obsolescence), a été élaboré. Le résultat de cet outil est un score (en pourcentage) attribué à chaque indicateur, permettant au ministère de mieux appréhender les capacités des contractants. Il s'agit du seul travail empirique et pratique recensé dans la littérature. TOMCAT présente toutefois plusieurs limitations. Premièrement, il est la propriété du ministère de la Défense et son acquisition est soumise à des restrictions. Deuxièmement, il s'agit d'un test externe réalisé par un organisme tiers, alors que l'outil de mesure de la maturité proposé ici peut être intégré à l'auto-évaluation et utilisé en interne. Il ne fournit pas de niveau de maturité ni de plan d'amélioration ; il attribue uniquement des scores, que l'utilisateur peut interpréter subjectivement.

1.2.4 La prise de décision en gestion de l'obsolescence

Les premières contributions dans le cadre de l'évaluation de la performance multicritères sont apparues dans les années 1980. Par exemple, Globerson, 1985 a proposé une approche structurée en 4 étapes : (1) choix de critères critiques vis-à-vis des clients, des employés et des dirigeants, (2) mise en place d'indicateurs suivant ces critères, (3) définition des objectifs (cibles) par étalonnage concurrentiel (benchmark) et (4) conception d'une boucle de pilotage pour corriger les écarts entre les performances réalisées et les objectifs. D'autres travaux ont été depuis proposés dans la littérature. Certains d'entre eux intègrent des critères environnementaux et/ou sociaux.

L'aide à la décision en gestion de l'obsolescence

La première tentative d'aide à la décision dans la gestion de l'obsolescence technologique a été une approche basée sur l'analyse économique (Porter, 1998). Le travail a fourni une formulation de la valeur actualisée nette du dernier achat (LTB) et du *design refresh planning*. Le modèle recherche un compromis possible entre les deux stratégies. Il aide les ingénieurs en obsolescence à développer une solution en fournissant un tableau de l'année de rentabilité qui

peut donner la meilleure année pour le design refresh. Ce modèle permet un seul design refresh. La stratégie de la LTB est une stratégie de résolution largement étudiée en raison de son utilisation courante dans la pratique (Shi & Liu, 2020). Feng, Singh, & Sandborn, 2007 ont établi une liste de facteurs dans le calcul des coûts. Il comprend : le coût d'approvisionnement, le coût des stocks, le coût d'élimination et le coût des pénalités. Acevedo-Ojeda, Contreras, & Chen, 2020 ont proposé une formulation de programmation mixte en nombres entiers pour considérer l'obsolescence des composants dans un problème de dimensionnement de lots à deux niveaux.

Le design refresh a également été également bien étudié. Un modèle développé dans Singh & Sandborn, 2006, est basé sur l'analyse des coûts et fournit le plan de *design refresh* optimal afin de couvrir le coût de maintenance du produit durant sa durée de vie totale. Il optimise le coût en permettant plusieurs *design refresh*. L'évolution de cycle de vie du produit a été simulée par Hu & Bidanda, 2009 en utilisant la programmation dynamique stochastique pour prendre des décisions avec un processus de décision de Markov. Plusieurs autres études ont tenté de résoudre le problème de l'obsolescence en utilisant différentes techniques, telles que le modèle *Restless Bandit* (Kumar & Saranga, 2010), la programmation en nombres entiers (Zheng et al., 2015), la théorie des graphes et la programmation linéaire mixte (Meng et al., 2014). Les recherches antérieures sont axées sur la réduction des coûts et ne prennent en compte que deux stratégies de résolution (LTB et Design refresh) parmi l'ensemble des profils de résolution, ce qui fait qu'elles négligent l'aspect durabilité du problème.

D'autres études ont considéré l'obsolescence technologique des composants comme un critère dans le processus de décision de nombreux problèmes tels que l'entretien du réseau d'eau potable et d'égouts (Werey, et al 2018), l'évaluation de l'obsolescence des logiciels (Bolwds et al 2018), dans le problème d'achat de matériel où Battini, Calzavara, Isolan, Sgarbossa, & Zangaro, 2018 ont développé un modèle bi-objectif pour soutenir les gestionnaires dans leurs décisions et identifier une taille de commande durable lorsqu'une politique de plafonnement et d'échange est possible (*cap and trade mitigation policy*). L'obsolescence a été considérée, à titre d'exemple, l'un des critères dans la conception d'une chaîne d'approvisionnement en

boucle fermée durable (*SCLSC Sustainable Closed Loop Supply Chain*) dans l'industrie de la fabrication d'appareils électroménagers. Elle vise à optimiser la minimisation du coût total, la minimisation des émissions de carbone et la maximisation des avantages sociaux (Xiao et al., 2025). Une autre étude a avancé la notion de TRL (*Technology Readiness Level*) pour y inclure un facteur lié à l'obsolescence (Nilchiani, Caddell, & Taramsari, 2025). Les publications investiguées sont classées selon leurs méthodologies, objectifs et stratégie de résolution dans le Tableau 1.1 Résumé des plus importantes publications dans la prise de décision en gestion de l'obsolescence.

Tableau 1.1 Résumé des plus importantes publications dans la prise de décision en gestion de l'obsolescence

Publication	Objectif(s)		Critères		Stratégie de résolution		
	Mono-objectif	Multi-objectifs	Économiques et/ Technologiques	Autres (environnementaux)	LTB	DR	Autre
Porter 98	x		x		x	x	
Teuntera and Fortuin 99	x		x		x		
Sandborn, 2006	x		x			x	
Feng et al 2007	x		x		x		
Hu and Bidanda 2009	x		x		x	x	
Kumar 2010	x		x		x	x	

Publication	Objectif(s)		Critères		Stratégie de résolution		
	Mono-objectif	Multi-objectifs	Économiques et/ Technologiques	Autres (environnementaux)	LTB	DR	Autre
Zheng et al 2012	x		x			x	
Meng et al 2014	x		x			x	
Shen and Williams 2014	x		x	x	x	x	
Zheng 2015	x		x			x	
Caetani, Ferreira et al. 2016	x		x		x		
Adetunji, Bischoff et al. 2018		x	x	x			
Shi 2019	x		x		x		
Nguyen and Wang 2019	x		x				

1.3 Identification des pistes de recherche

La revue de littérature a permis de voir le contexte complexe et ramifié de la gestion de l'obsolescence et son chevauchement avec plusieurs autres domaines sur plusieurs dimensions, tels que la gestion de cycle de vie, le développement durable, l'aide à la décision.. etc

Plusieurs écarts ont été identifiés, notamment celui-ci : la résolution des problèmes d'obsolescence technologique n'a pas pris en compte le facteur de durabilité, même si

l'environnement est directement touché par les déchets électroniques. Cette piste de recherche a été adoptée et répond parfaitement aux besoins industriels et académiques. Pour cela, il est très important d'explorer la problématique de plusieurs points de vue et fournir l'image complète de ce sujet méconnu.

Trois principales directions sont envisageables afin d'enrichir la recherche scientifique et contribuer au développement industriel qui sont :

- L'intégration des dimensions de développement durable dans la prise de décision dans la gestion de l'obsolescence considérant son impact environnemental conséquent.
- Considérer toutes les alternatives dans la résolution d'un cas d'obsolescence afin d'optimiser les aspects économiques, mais aussi environnementaux et boucler la chaîne d'une économie circulaire.
- Modéliser et optimiser une chaîne logistique durable qui prend en compte l'obsolescence technologique dans le but de résilience et durabilité

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre vise à justifier et expliquer le choix et la démarche méthodologique de ces travaux de recherche. Trois principales sections sont discutées. La première présente le choix de la méthodologie de recherche suivie, la deuxième présente la stratégie détaillée et le lien entre les articles, et la dernière présente les articles de revue.

2.1 Choix de la démarche méthodologique

La formulation de la problématique de recherche est introduite par le cadre général du projet CRIAQ-LEAN-501-T6. En effet, ces travaux ont été motivés par un besoin industriel accru. Pour y répondre, l'étude avait deux volets simultanés : l'analyse de la problématique industrielle et l'identification des solutions de la littérature afin de trouver les chemins possibles menant à des résultats satisfaisants d'une part et l'amélioration de la solution d'autre part.

La recherche se pose sur deux phases. La 1^{ère} phase consiste à cerner les problèmes au sein de l'entreprise par une analyse approfondie du processus de gestion de l'obsolescence existant et proposer une solution supportée par l'état de l'art (Figure 2.1). La 2^{ème} phase se base sur l'amélioration de la solution appuyée par les lacunes identifiées dans la littérature. Comme toute recherche suit une démarche méthodologique, dans cette étude, la méthodologie principale suivie dans la 1^{ère} phase est celle dictée par l'étude de cas proposée par (Yin, 2013) qui sert à comprendre en profondeur un phénomène réel dans son contexte naturel et sur la science de la conception pour la 2^{ème} phase qui sert à créer et évaluer un artefact innovant (modèle, méthode, système, outil...) pour résoudre un problème concret (Peffer, Tuunanen, Rothenberger, & Chatterjee, 2007).

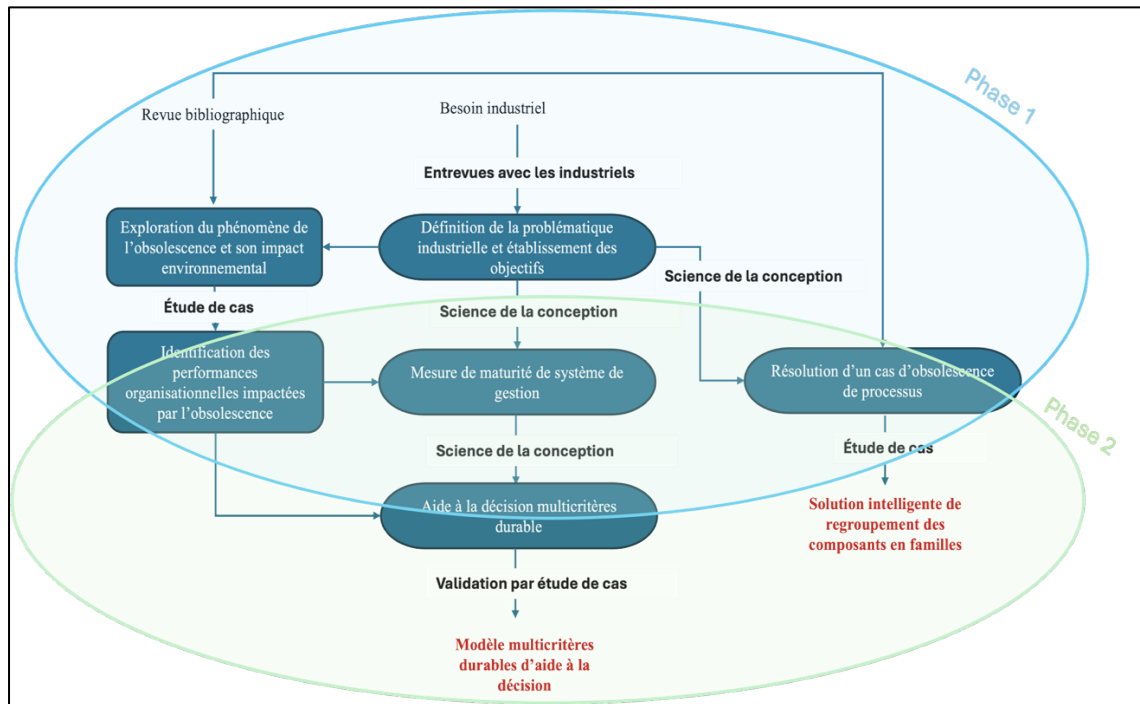


Figure 2.1 Détails de la méthodologie de recherche

Pour en arriver à un point qui réunit à la fois une contribution scientifique et une solution industrielle, les travaux de recherche se présentent sous forme de plusieurs sous-problèmes interconnectés dont chacun a été résolu par une méthodologie qui lui est spécifique (étude de cas, science de la conception ou une méthodologie hybride). Cet ensemble de sous-problèmes décrit dans la Figure 0.2 présente l'ensemble des concepts clés, précédemment définis dans la littérature, et les liens entre eux.

2.2 Stratégie de recherche

L'objectif principal de la thèse vise à comprendre l'obsolescence technologique et améliorer sa gestion dans un contexte industriel rigide et complexe. La problématique est traitée à très haut niveau de confidentialité, considérant son domaine d'application critique qui est la défense, entraînant ainsi une rareté des données. Ces travaux se sont basés sur de multiples cas d'études, soit pour explorer, décrire et expliquer le phénomène ou pour développer et valider les modèles développés. Cela a permis d'analyser et de mieux comprendre la gestion de

l'obsolescence, ses opportunités, ses menaces, ses points forts et ses points faibles et faire face aux contraintes économiques, technologiques, sociales et environnementales.

Dans le but de développer et d'améliorer la gestion de l'obsolescence des composants électroniques, la démarche méthodologique suit les mêmes étapes que la science de conception : identification du problème, sélection de solutions, développement et démonstration de la solution choisie et, finalement, l'interprétation. Nous utilisons une approche où nous observerons d'abord de près les détails des modèles de gestion de l'obsolescence. Ensuite, nous obtiendrons une perspective plus large en intégrant la composante de développement durable. Ainsi, nous transférerons les avantages de la gestion stratégique durable et étudierons comment les deux niveaux de décision interagissent. La Figure 2.2 fournit un récapitulatif de la méthodologie de recherche.

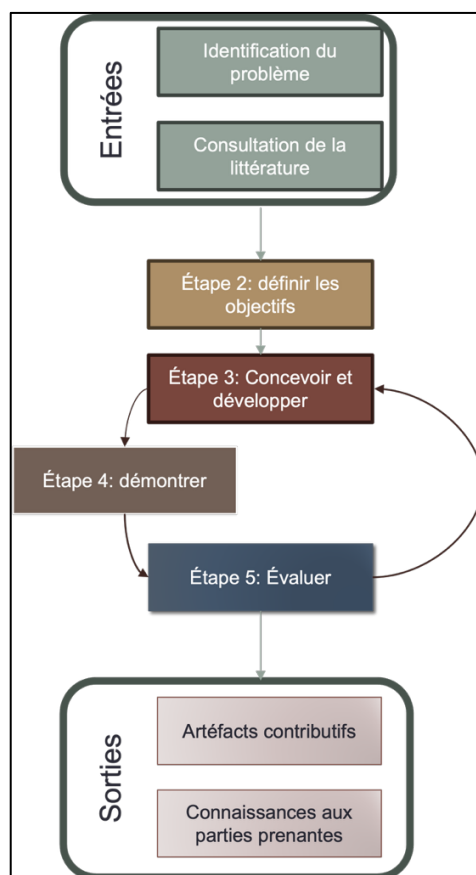


Figure 2.2 Récapitulatif de la méthodologie de recherche

La recherche présentée dans ce travail a permis d'élaborer trois articles de revue qui sont inclus intégralement entre les chapitres 3 à 6. Les détails des méthodologies employées dans chacun sont abordés dans la section suivante.

2.3 Démarche conceptuelle d'amélioration de la gestion d'obsolescence

Le choix des méthodes de science conception et d'étude de cas dans ce travail est justifié en se reposant sur deux atouts importants, la littérature et le besoin industriel. Dans cette section, la méthodologie employée pour répondre à chacune des questions de recherche est présentée. Elle est abordée selon les étapes décrites dans la Figure 0.3 .

2.3.1 Étape 1 : Explorer la problématique et évaluer l'impact

Pour répondre aux questions mentionnées dans l'introduction de ce manuscrit, à la toute première étape, une exploration de la problématique et investigation de l'impact de l'obsolescence technologique sur les performances organisationnelles et ses liens avec les déchets EEE est menée. Le but était d'évaluer cet impact et identifier les performances organisationnelles touchées afin de les utiliser comme métriques dans notre mission d'améliorer le système de gestion (Figure 0.2). Nous considérons que les études de cas représentent une méthodologie appropriée qui nous permet d'investiguer une problématique, d'identifier ses facteurs et de décrire ou quantifier son impact. L'analyse bibliographique menée en parallèle a permis de voir plus en profondeur l'étendue de l'obsolescence technologique et son impact environnemental.

Article de revue : L'obsolescence technologique des composants et équipements électroniques : enjeux et défis

Le but initial de ce projet de recherche était de modéliser et d'optimiser la gestion de l'obsolescence technologique pour une chaîne logistique durable. Malheureusement, le lien entre l'obsolescence et la littérature n'a pas été établi pour travailler sur ce sujet. La recherche

a commencé par une étude exploratoire de l'impact de l'obsolescence sur les performances organisationnelles. Pour arriver à introduire la composante « obsolescence » dans les modèles de gestion de la chaîne logistique, il a fallu expliquer cet impact et justifier l'investissement possible dans cette direction de recherche. Pour cette finalité, pour ce jeune sujet de recherche, la littérature scientifique et publique a été examinée pour identifier les possibles liens. La méthodologie adoptée pour explorer ce domaine consiste au début à des échanges avec des experts en électronique, gestion des déchets électroniques, en économie circulaire et en obsolescence technologique. Les résultats préliminaires de ces échanges ont été confirmés par une recherche bibliographique dans les bases des données scientifiques et publiques (Figure 2.3).

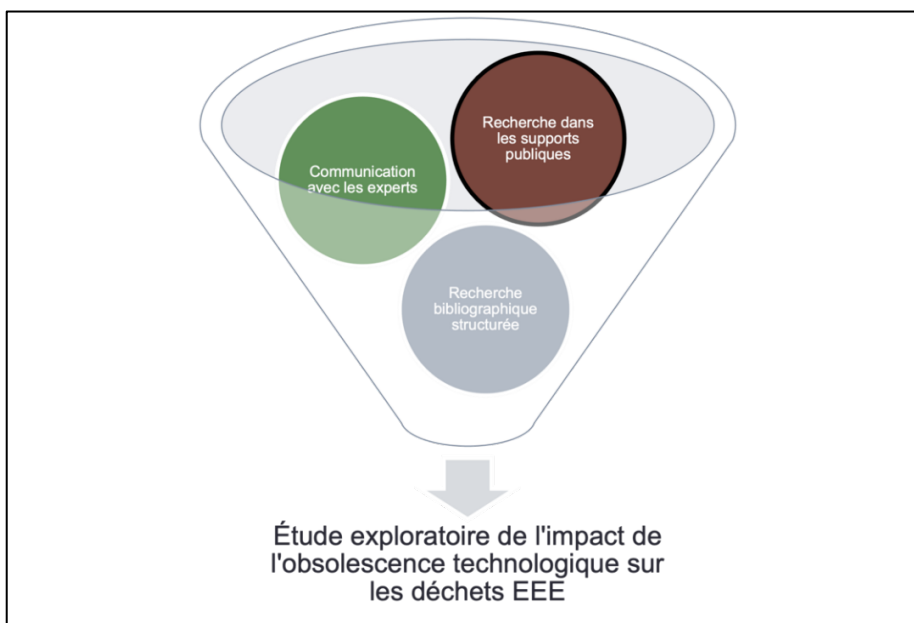


Figure 2.3 Sources de l'étude exploratoire de l'impact de l'obsolescence technologique

Article de conférence: The impact of parts obsolescence on organization's performances: a case study in the aeronautic industry

Le premier objectif de ces travaux de recherche est d'améliorer la gestion de l'obsolescence dès sa source jusqu'au bout de la chaîne logistique. Durant l'exploration de la problématique

chez notre partenaire industriel, l'impact de l'obsolescence autre que l'impact économique était inconnu. Cette exploration étudie le problème de l'obsolescence d'un point de vue organisationnel, un problème qui a toujours été étudié d'un point de vue système. Cela constitue la première pierre d'une nouvelle orientation de recherche visant à évoluer avec les progrès technologiques dynamiques et à répondre au besoin industriel d'atténuer et de résoudre les cas d'obsolescence. La contribution scientifique de cet article est de souligner l'impact considérable de ce risque sur les organisations, qui a toujours été ignoré. La preuve en est fournie par l'industrie. La méthodologie suivie est celle de l'étude de cas proposée par Yin, 2013. L'objectif était de valider l'ensemble des disciplines impactées par l'obsolescence et les enrichir par l'expérience et le vécu de notre partenaire industriel. L'ensemble des étapes, recommandées par Yin, 2013, sont décrites dans la figure ci-dessous.

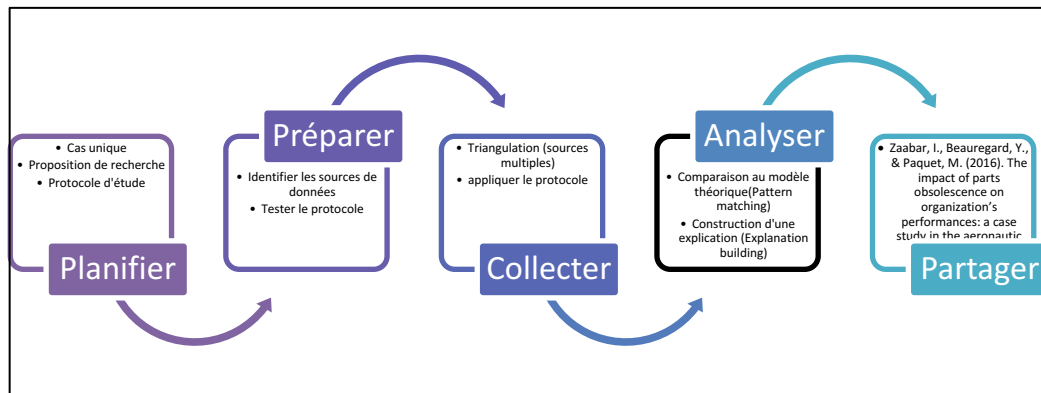


Figure 2.4 Étape de la méthodologie de l'étude de cas

Tirée de Yin (2013)

La méthode de Yin, 2013 se distingue par son cadre systématique, explicite et reproductible, qui vise à faire de l'étude de cas une méthode scientifique à part entière, et non simplement une exploration descriptive. L'étude a donc été évaluée selon les critères de qualité de la même référence.

Tableau 2.1 Évaluation des travaux par les quatre critères de qualité

Critère de qualité	Définition	Tactique
Validité du construit	Mesurer ou identifier correctement les concepts étudiés	Utilisation des sources multiples : triangulation. Faire valider l'article par des experts (industriels et académiques).
Validité interne	Établir les relations causales, montrer que les indicateurs de performances sont bien influencés par l'obsolescence	Comparer le modèle empirique (ce que montrent les données) avec le modèle prédit (basé sur la revue de la littérature).
Validité externe	Pouvoir généraliser les résultats à un contexte plus large	Propositions confirmées par des travaux de recherche antérieures.
Fiabilité	S'assurer que l'étude peut être répétée avec les mêmes résultats	Protocole d'étude de cas disponible

Cette étude exploratoire fournit des pistes et des orientations précieuses pour améliorer les systèmes actuels de gestion de l'obsolescence en introduisant les performances des organisations. La quantification de l'impact du risque sur les performances semble dépendre de deux facteurs : la gestion du processus d'obsolescence et les politiques de l'entreprise. En outre, ce travail empirique met en évidence l'évolution considérable du risque d'obsolescence, qui constitue une préoccupation majeure dans toutes les industries technologiques.

2.3.2 Étape 2 : Atténuer le risque et résoudre un cas

Article de conférence: Evaluation and validation of a maturity model in obsolescence management for increased performances

La principale contribution de cet article est de présenter un modèle de maturité validé en matière de gestion de l'obsolescence afin de soutenir l'amélioration continue et la durabilité. Il a été élaboré en deux phases, en tenant compte de toutes les étapes et recommandations de la science de la recherche en conception (Peffer et al., 2007). La première phase a consisté à

développer le modèle théorique. La deuxième phase a consisté à démontrer et à valider le modèle développé à l'aide d'études de cas (Yin, 2013) dans le cadre desquelles des enquêtes de satisfaction ont été réalisées à l'aide d'entretiens semi-structurés afin de valider, d'améliorer et de rendre le modèle plus pratique dans un contexte industriel. La méthodologie de recherche est décrite dans la Figure 2.5.

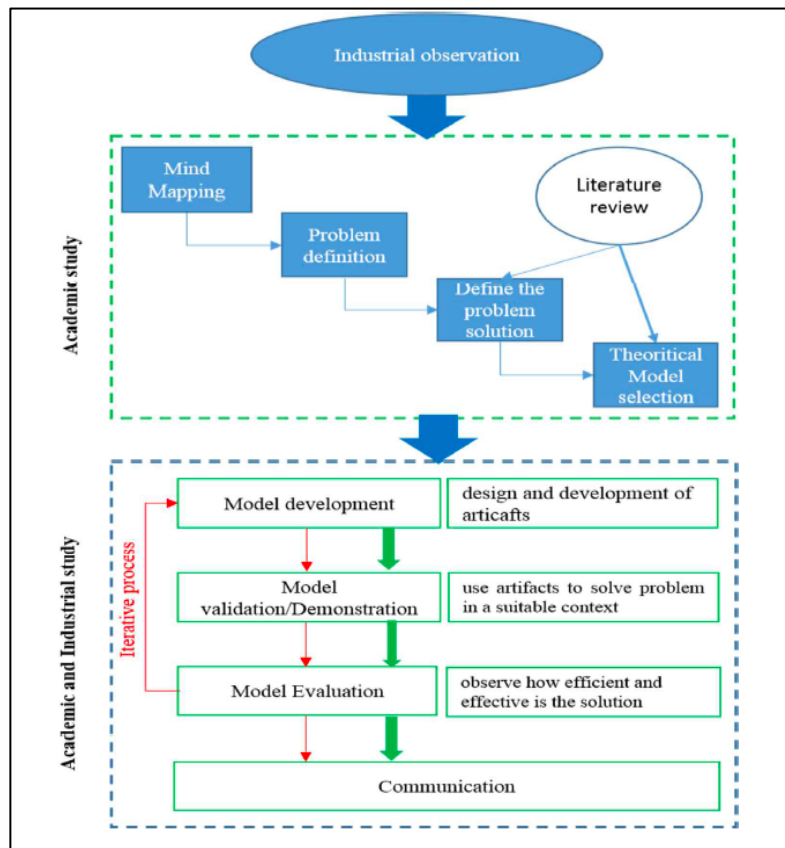


Figure 2.5 Méthodologie de science de conception appliquée au développement du modèle de maturité

Tirée de Zaabar et al. (2017)

Cette étude a permis de développer un modèle de maturité de base pour la gestion de l'obsolescence qui couvre tous les domaines de processus pouvant être affectés par l'obsolescence ou impliqués dans sa gestion, les objectifs génériques, les objectifs spécifiques, les activités et les tâches. Le modèle a été testé et évalué dans plusieurs secteurs industriels. L'outil décrit dans cet article a été principalement développé pour permettre aux gestionnaires

de mieux gérer le risque d'obsolescence. Il présente une base pour un modèle de maturité standard et général en matière de gestion de l'obsolescence, permettant la comparaison entre les organisations, mais aussi l'amélioration continue et la durabilité. Cet outil aidera les entreprises à mieux choisir leurs fournisseurs avant ou après le passage des contrats traditionnels, car il s'applique aussi bien aux fournisseurs qu'aux clients. En résumé, les avantages pour les organisations d'utiliser un outil de mesure de la maturité dans la gestion de l'obsolescence sont les suivants :

- Mesurer le niveau de maturité actuel
- Comparer les niveaux de maturité avec ceux des concurrents
- Mesurer le niveau de maturité des fournisseurs
- Aider les fournisseurs et les clients à améliorer leur niveau de maturité
- Atteindre des objectifs génériques et spécifiques en ce qui concerne les entreprises, les normes IEC2007 et ISO9001 pour une amélioration continue

Article de revue : A two phase part family formation model to optimize resource: a case study in the electronics industry

Dans le cadre de ces travaux de recherche, nous avons rencontré un cas d'obsolescence de processus. Ce type spécifique d'obsolescence est également propulsé par l'évolution technologique. La méthodologie suivie est celle de la science de conception, le modèle est validé ensuite par une étude de cas. La démarche de la science de conception est une approche de recherche scientifique qui consiste à développer une solution pour résoudre soit un problème non résolu, soit à améliorer un résultat d'une solution existante. Les solutions de conception peuvent être un modèle, une méthode ou même un concept. De ce fait, le choix de la science de la conception semble justifié (Figure 2.6).

La démarche du travail commence par analyser la situation dans l'entreprise. L'obsolescence est avérée, par la suite, une obsolescence de processus. La multiplication de la quantité des composants électroniques produits, leurs évolutions et leur technologie de pointe a engendré l'obsolescence inévitable de processus de regroupement des composants produits en familles

de composant. L'objectif de la formation de ces familles était pour des fins de planification de la production. Pour résoudre cette problématique, on a fait appel à des techniques d'apprentissage machine.

Dans cette étude, un modèle de regroupement en deux phases pour la formation de familles de pièces a été développé afin d'optimiser la planification des ressources. Bien que les approches existantes fournissent de bonnes solutions dans un contexte de demande changeante et volatile, aucune étude intégrée ne prend en compte à la fois la configuration fixe des machines et l'incertitude liée aux limites de production.

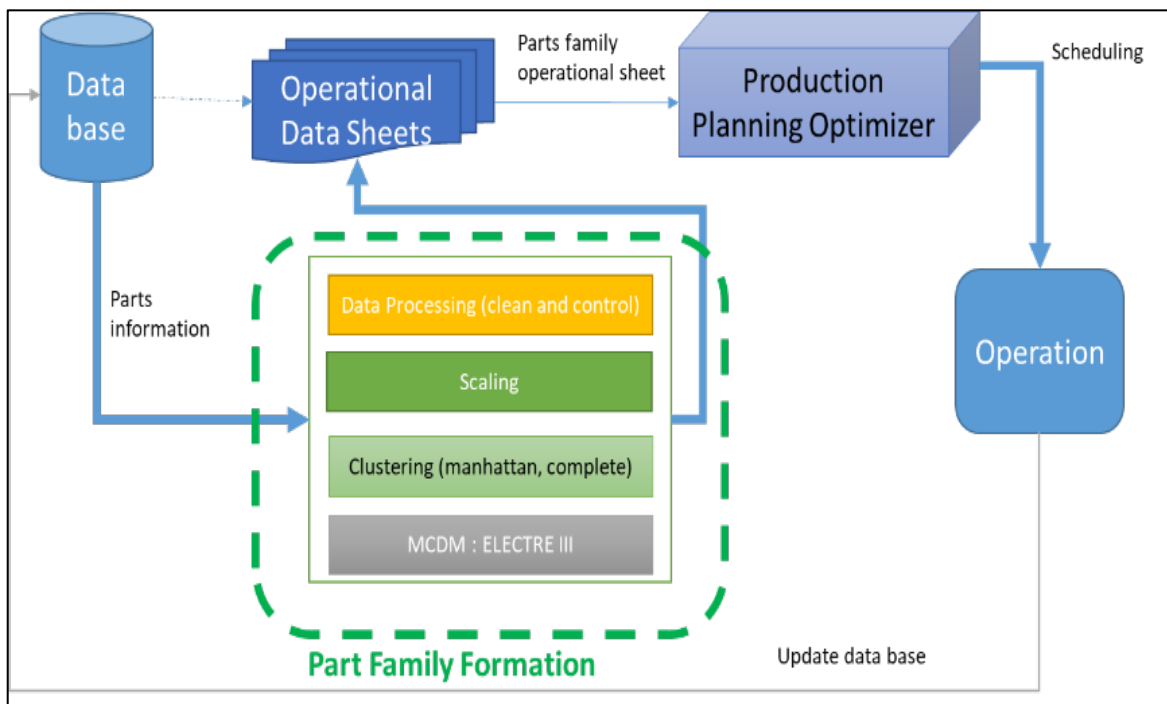


Figure 2.6 Méthodologie de recherche pour la résolution d'un cas d'obsolescence de processus

Tirée de Zaabar (2022)

La solution hybride combine plusieurs concepts et approches pour soutenir l'objectif de recherche, tels qu'un algorithme de regroupement, le calcul de similarité et des techniques de prise de décision multicritères. La méthodologie intégrée proposée permet simultanément la formation de familles de pièces et l'optimisation de la planification. Les performances de cette

approche, comparées à celles des méthodes actuellement utilisées dans l'entreprise, donnent des résultats prometteurs. Les mesures de performance introduites montrent que la solution permet de gérer efficacement la formation de familles dans des conditions d'incertitude. Il est important de mentionner que la méthode proposée a bien fonctionné pour les ensembles de données de petite et moyenne taille, et qu'elle était acceptable en termes de temps et de coût.

2.3.3 Étape 3 : Prendre des décisions durables

Article de revue : A sustainable multicriteria decision framework for obsolescence resolution strategy selection

Méconnue, l'obsolescence technologique a été toujours limitée dans sa gestion et sa résolution. Son impact étudié dans (Zaabar et al., 2016) dans le cadre de ce projet de recherche a poussé à creuser dans la durabilité des solutions. Cela a impliqué l'intégration des artefacts de durabilité dans la prise de décision qui se rajoutent aux critères économiques et technologiques. L'élaboration de la solution de prise de décision durable a également suivi les étapes de science de conception recommandés par (Peffer et al., 2007). La méthodologie détaillée est décrite dans la Figure 2.7.

Compte tenu des multiples éléments qui influent sur le choix d'une solution lorsqu'un composant devient obsolète, tels que le coût, les améliorations technologiques et fonctionnelles, les contraintes des parties prenantes et la durabilité de la solution, aucune stratégie axée sur un seul élément ne peut fournir une évaluation fiable. La meilleure stratégie de résolution de l'obsolescence des composants serait basée sur plusieurs critères plutôt que sur un seul élément. Outre la complexité du problème, la subjectivité du choix d'une solution joue un rôle central dans le processus de gestion de l'obsolescence. Dans ces travaux, un cadre de prise de décision pour la sélection des stratégies de résolution (*ORS Obsolescence Resolution Strategy*) a été développé. Justifié par la multitude des critères, l'outil s'est basé sur la théorie d'aide à la décision multicritère MCDA (Multi Criteria Decision Aid).

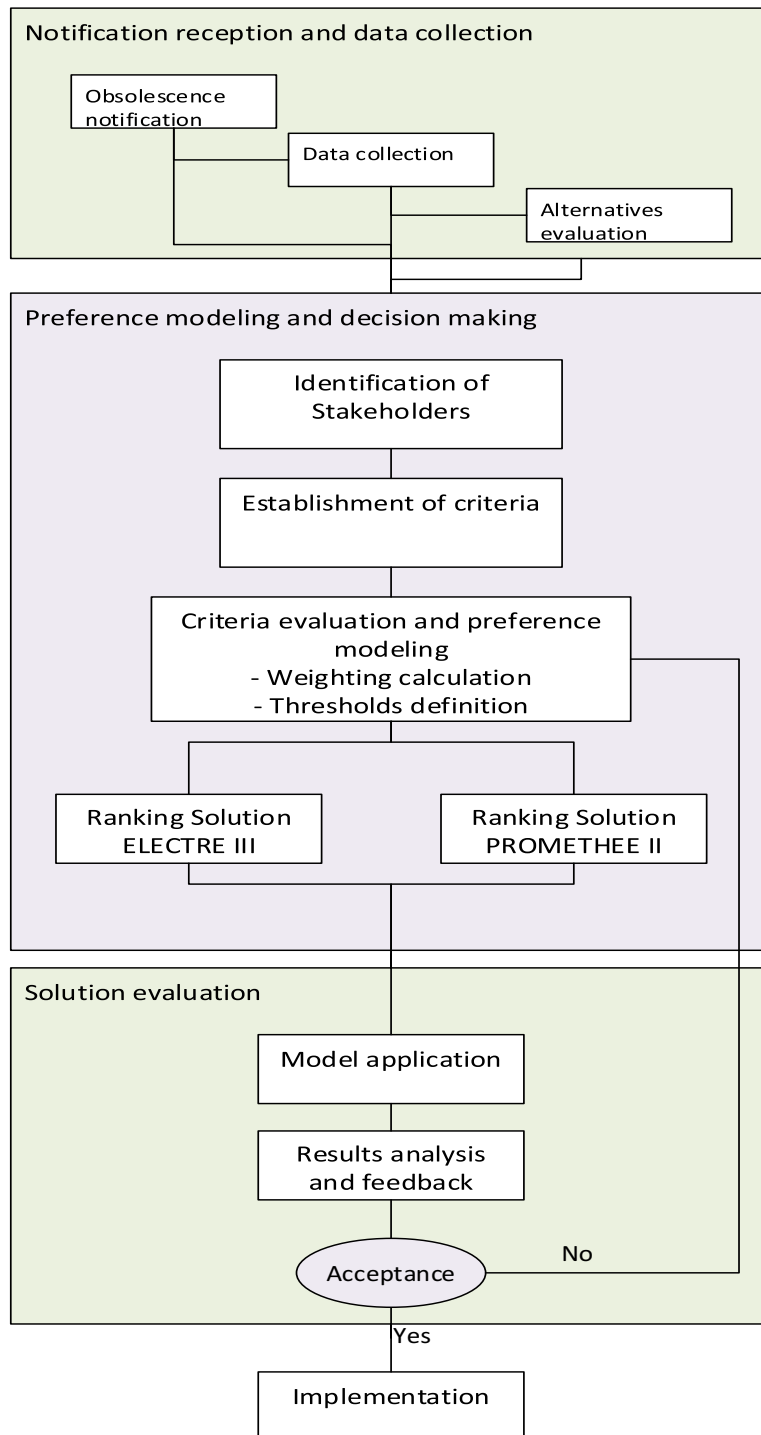


Figure 2.7 Méthodologie de recherche du développement d'un modèle multicritère de prise de décision en gestion d'obsolescence

Tirée de Zaabar (2022)

Selon cette stratégie, le décideur peut déclarer que les critères sont suffisamment importants pour refuser tout type de compensation ou de compromis. Cela offre une meilleure satisfaction aux décideurs. La méthode de décision adoptée repose sur un environnement opérationnel hautement régularisé où les critères de compensation ne sont pas privilégiés. Ainsi, les approches de synthèse unique compensatoire, telles que la MAUT (théorie de l'utilité multi-attributs) ou l'AHP (processus hiérarchique analytique) ont été rejetées (bien que certaines techniques développées dans le cadre de l'AHP aient été utilisées pour déterminer la pondération des critères). ELECTRE III (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) et PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) ont été sélectionnées pour être utilisées dans ce travail en raison de leur compatibilité avec la nature discrète, hiérarchique et non compensatoire du problème et de leur efficacité avérée dans des contextes similaires.

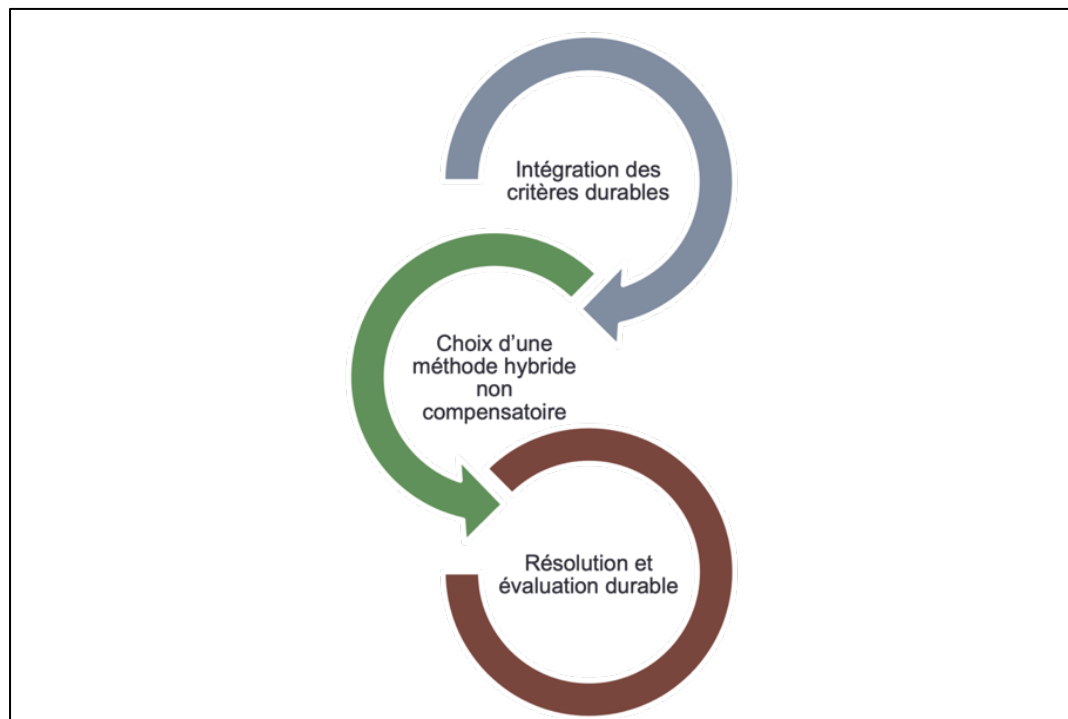


Figure 2.8 Prise de décision durable en gestion de l'obsolescence technologique

CHAPITRE 3

L'OBSOLESCENCE TECHNOLOGIQUE DES COMPOSANTS ET ÉQUIPEMENTS ÉLECTRONIQUES : ENJEUX ET DÉFIS

Imen Zaabar^a *, Yvan Beauregard^a and Marc Paquet^b

^aÉcole de Technologie Supérieure, Département de génie mécanique, 1100 Rue Notre Dame
O, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

^bÉcole de Technologie Supérieure, Département de génie des systèmes, 1100 Rue Notre
Dame O, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

Article publié dans le journal “Techniques de l'ingénieur”, Avril 2023

Résumé

L'obsolescence technologique est inévitable dans tous les systèmes et produits employant des composants électroniques. C'est un phénomène catalysé par la concurrence, nécessitant un modèle de gestion complexe et causant, programmé comme spontané, l'un des plus grands flux des déchets d'équipements électriques et électroniques EEE dans le monde. Cet article traite la problématique de gestion de l'obsolescence des composants électriques et électroniques intégrant les systèmes à longue durée de vie. Pour ensuite, aborder l'obsolescence des petits équipements électriques et électroniques, leur tendance de production, de consommation et d'obsolescence. Un aperçu de l'impact environnemental est proposé à la fin dans le but d'un usage durable.

Abstract

Technological obsolescence is inevitable in all systems and products using electronic components. The phenomenon is catalyzed by competition, requiring a complex management model and generating, by both programmed and spontaneous obsolescence, one of the largest flows of electrical and electronic equipment EEE waste in the world. This article deals with the problem of managing the obsolescence of electrical and electronic components in long-life cycle systems. It then addresses the obsolescence of small electrical and electronic

equipment's, their production, consumption and obsolescence trends. An overview of the environmental impact is proposed at the end to promote sustainability.

3.1 Introduction

La mise en œuvre de nouvelles technologies rend leurs prédécesseuses désuètes, inutiles et difficile à maintenir en raison de la diminution de la disponibilité des composants, des fournisseurs et de la technicité. Selon la norme IEC 62402 :2019 (IEC, 2019) le risque d'obsolescence est inévitable. En effet, des études ont montré que jusqu'à 70 % des composants électroniques du commerce (COTS : Commerce Off The Shelf) sont obsolètes avant que le produit ne soit lancé sur le marché.

L'industrie électronique est actuellement l'une des industries les plus dynamiques de l'économie mondiale. Sa croissance massive, les investissements et la concurrence ont été stimulés par la demande grandissante de nouvelles technologies innovantes. De nouveaux composants sont introduits sur le marché de plus en plus rapidement avec de plus petites tailles, une consommation plus faible en énergie, de la différenciation, de la personnalisation, et avec des fonctionnalités améliorées, ce qui conduit à l'obsolescence des anciennes versions, mais également à une complexité croissante des équipements technologiques. En conséquence, la période de vie utile des composants diminue au fur et à mesure que d'autres plus avancés deviennent disponibles. Cela pose de multiples problèmes aux fabricants des systèmes à long cycle de vie à la suite de l'incompatibilité des durées des cycles de vie. Cet écart est ainsi à l'origine de l'obsolescence technologique abordée dans la section 3.2. Un exemple explicatif est le secteur aéronautique où les avions dépendants des mêmes composants et fournisseurs que le marché de l'électronique grand public, dont le volume est plus élevé. Le cycle de vie des composants est normalement d'environ deux à trois ans, alors que la durée de vie d'une aéronautique, de l'approvisionnement et la disponibilité des pièces de rechange sont beaucoup plus longs et estimé à plus de cinquante ans. Comme les constructeurs aéronautiques ne sont pas des acheteurs relativement importants de ces composants, les fabricants d'électronique ont tendance à réorienter leur production et à consolider leur capacité pour les composants de

nouvelles technologies demandées par les clients à gros volumes, c'est-à-dire le marché de l'électronique produit en masse tels que les petits électroménagers, les équipements de jeux vidéo et de photographie. Ce qui crée des difficultés d'approvisionnement pour le secteur et le composant devient alors obsolète, car il n'est plus disponible chez son manufacturier d'origine. Un marché secondaire des composants émergera et les composants resteront généralement disponibles pendant une période plus longue. Cependant, cela entraînera des coûts élevés, des requalifications, du risque de contrefaçon et d'une éventuelle perte de fonctionnalités plus rapide que prévu. La sélection des composants et des fournisseurs dans la conception de nouveaux produits doit faire l'objet d'une plus grande attention. Plusieurs solutions peuvent être envisagées et sont énumérées dans la section 5.2. Pour ce cas de figure, on parle de l'obsolescence spontanée, car ni le fabricant ni le fournisseur n'avaient l'intention préalable de rendre désuète un système ou un produit au bout d'une période si courte. La prise de décision est cruciale et doit considérer des critères technologiques, économiques, sociaux et environnementaux ainsi que les départements de l'entreprise impactés et les acteurs de sa chaîne logistique. La problématique s'avère ainsi plus sévère pour d'autres secteurs tels que l'avionique, le secteur militaire ou encore les installations nucléaires.

Les difficultés liées à l'obsolescence technologique ne sont pas limitées aux systèmes à cycle de vie long, elles touchent également les produits à court et moyen cycle de vie, pour provoquer de nouvelles préoccupations tels que les déchets électriques et électroniques. Le duo longévité/obsolescence est un critère important pour la compétitivité des entreprises et la satisfaction de leurs clients, mais aussi très contraignant en termes de respect de l'environnement et de développement durable. Un aperçu sur l'obsolescence des petits produits électroniques est abordé à la section 3.3 qui sera suivie par un aperçu sur les déchets EEE.

3.2 L'obsolescence des systèmes à long cycle de vie

Au cours des dernières décennies, la technologie a connu une croissance exponentielle, ce qui a entraîné l'introduction rapide de nouveaux composants dotés de fonctionnalités et de caractéristiques avancées. Le phénomène est spécifique à l'électronique et est caractérisé par

le doublement de la vitesse de traitement des ordinateurs tous les deux ans, une loi connue sous le nom de la loi de Moore. La philosophie qui régit la loi de Moore stipule que la densité des composants (ou le nombre de transistors sur les circuits intégrés) double tous les 24 mois. Cela a conduit à une pression accrue pour remplacer et/ou mettre à niveau les composants et/ou les sous-systèmes des produits technologiques manufacturés. Dans les industries des systèmes à long cycle de vie telles que l'espace, l'avionique et la défense, la durée de vie des systèmes peut s'étendre sur plusieurs décennies. L'un des principaux problèmes auxquels ces systèmes sont confrontés pendant leur durée de vie est l'obsolescence (Meyer et al., 2004). Avec son empreinte économique importante coûtant par exemple environ 750M\$ au département de la défense aux états unis et l'équivalent de 9 Milliards de dollars sur 12 ans, des approches de gestion ont été conçues dans un contexte de minimisation des coûts total de possession du système (Adetunji, 2021; Adetunji et al., 2018; Wilkinson, 2015).

Plusieurs stratégies sont possibles pour optimiser la gestion de l'obsolescence dans les systèmes à cycle de vie long tels que, la sélection des composants dès la préconception, la veille technologique, la prévision de l'obsolescence et la classification des composants et équipements selon leur risque probable de devenir obsolète et leur criticité.

L'obsolescence d'une pièce peut être définie comme une situation dans laquelle le composant n'est plus disponible en stock ou ne peut plus être obtenu sous sa forme originale auprès de son fabricant d'origine (Bartels et al., 2012; Mastrangelo et al., 2021; Wilkinson, 2015; Zaabar et al., 2021). Cela est due principalement au décalage entre la durée de vie du produit (l'ensemble) et celle des pièces/composants (pièces individuelles ou sous-ensembles qui composent un produit). La gestion de cycle de vie PLM (Product Life Cycle Management) est ainsi un point crucial pour gérer l'obsolescence et contrôler son impact.

3.2.1 La gestion de cycle de vie (PLM : Product Life Cycle Management)

La gestion du cycle de vie des produits (Product Life cycle Management) est l'un des axes de la gestion de l'obsolescence. C'est un terme qui a considérablement évolué au cours de la

seconde moitié du 21^e siècle. Sa signification peut différer en fonction du contexte. Le terme a d'abord été lié aux différentes caractéristiques du marché d'un produit, de ses besoins et de ses évolutions pendant les années 1950. Ce modèle se concentre principalement sur les aspects économiques des quatre phases : l'introduction/le développement, la croissance, la maturité, et le déclin. Lors de développement du PLM, l'objectif était de produire un cadre cohérent pouvant se rapporter au succès ou à l'échec relatif d'un produit sur le marché (Cao & Folan, 2012). Il s'agit de savoir comment adapter les stratégies de tarification, de fabrication, d'investissements marketing et d'abandon éventuel à la phase que traverse le produit. Les différentes phases du modèle de base sont expliquées plus en détail dans la Figure 3.1. et le Tableau 3.1.

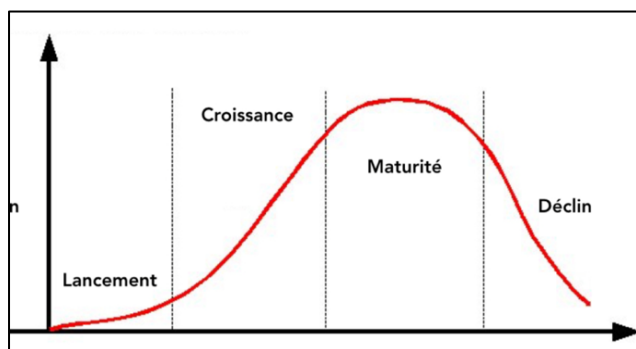


Figure 3.1 Courbe de cycle de vie d'un produit

Une forme plus récente de la théorie PLM est apparue lorsque le besoin de gérer la durée de vie des produits est devenu de plus en plus important. Cette théorie PLM a d'abord été développée et mise en œuvre par le ministère américain de la Défense afin d'accroître l'efficacité du processus d'approvisionnement, car il était essentiel d'inclure l'ensemble des coûts du cycle de vie du système et pas seulement les coûts d'achat initiaux. En outre, les différents stades de la vie d'un produit tels que la fin de vie ont été définis. Le suivi des cycles de vie a été rendu possible par les innovations en matière de technologie de l'information. Aujourd'hui, les logiciels PLM sont très bien intégrés dans l'infrastructure des entreprises, au même niveau que la gestion des relations avec la clientèle, la gestion de la chaîne d'approvisionnement, la gestion des ressources de l'entreprise et la gestion des données sur les

produits. Il permet d'optimiser l'ensemble des opérations d'une entreprise, depuis l'approvisionnement et la conception du produit jusqu'à son obsolescence (Bartels et al., 2012; Cao & Folan, 2012; Nunes, Kohlbeck, Beuren, Fagundes, & Pereira, 2021).

Tableau 3.1 Définition des phases de cycle de vie d'un produit

Phase de cycle de vie	Description	Caractéristiques
Lancement ou introduction	La phase d'introduction est le moment où un produit est lancé sur le marché. L'objectif de cette phase est de gagner des parts de marché, d'être accepté et de faire connaître aux clients potentiels son existence et ses avantages.	Coûts élevés dus aux investissements dans la promotion du marché. Faible concurrence, croissance des ventes, volume des ventes et marge bénéficiaire.
Croissance	Cette phase est celle où la croissance des ventes augmente de manière substantielle en raison d'une acceptation accrue du marché. La concurrence augmente au fur et à mesure que la sensibilisation et la taille du marché augmentent. Une offre de produits plus importante fait baisser les prix.	La réduction des coûts par unité vendue et la croissance significative du volume des ventes entraînent une augmentation de la marge bénéficiaire.
Maturité	La phase de maturité se caractérise par une stagnation de la croissance des ventes et l'intérêt est passé de la pénétration et du développement du marché à l'optimisation des bénéfices. La réduction des coûts est importante. La concurrence a commencé à s'atténuer alors que les ventes du marché amorcent leur déclin en volume.	Marges bénéficiaires plus élevées, croissance stagnante des ventes, coûts globaux faibles, faible besoin de promotion, moins de concurrents.
Déclin	C'est la phase où la croissance du volume des ventes est clairement négative. Les prix diminuent en raison de l'obsolescence des produits et la baisse du volume entraîne une augmentation des coûts. Pour réussir dans cette phase, l'efficacité de la production et de la distribution est la clé. Cependant, une extension de la durée de vie d'un produit est possible grâce au redéveloppement du produit, ce qui signifie que le produit peut être pertinent sur le marché pendant une plus longue période.	Diminution du volume des ventes et des bénéfices. Augmentation du coût

Le cycle de vie des composants électroniques

Dans le cadre de la recherche sur le cycle de vie des pièces électroniques, un nouveau modèle adapté aux composants électroniques a été développé (Huang et al., 2019) et est présenté dans la Figure 3.2. Cette courbe modifiée est une généralisation du cycle de vie que les composants sont censés suivre : introduction, croissance, maturité, déclin, retrait progressif et obsolescence. Il faut noter que les volumes de production sont maximisés dans la phase de maturité. De même, la courbe inverse volume/temps est valable pour le coût de production par unité et constitue un facteur contribuant à ce que les fabricants d'origine de composants abandonnent progressivement la production pour se réajuster aux nouveaux composants à volume élevé (Bartels et al., 2012; Huang et al., 2019; Sandborn, 2013). La théorie du cycle de vie des composants électroniques propose des moyens de gérer efficacement les problèmes liés au cycle de vie au cours des différentes phases.

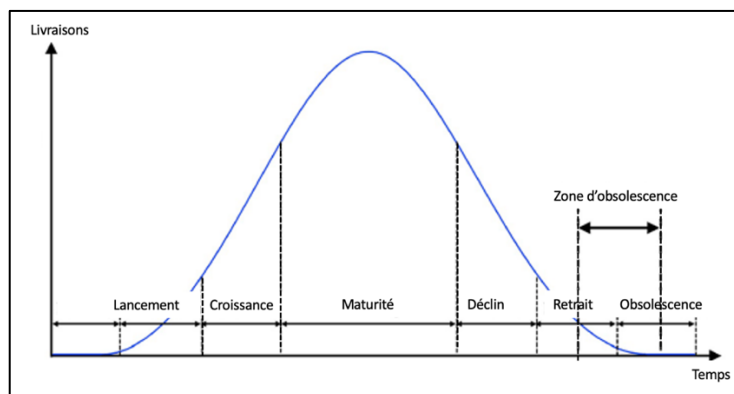


Figure 3.2 Le nouveau modèle de cycle de vie des composants électroniques

L'apparition de l'obsolescence commence dans la phase de retrait lorsque le fabricant d'origine décide de mettre fin à la production des composants. Le Tableau 3.2 donne une description plus explicite des caractéristiques typiques qui définissent les dernières phases de la Figure 3.2. Durant ces dernières phases, les entreprises dépendant des composants confrontés à l'obsolescence doivent planifier et surveiller la manière de gérer et d'atténuer les complications éventuelles qui pourraient affecter leurs produits. Cela pourrait être fait en surveillant de

manière proactive les portefeuilles de produits de l'entreprise et les cycles de vie du produit afin de garantir l'approvisionnement en composants tout au long de sa vie.

Tableau 3.2 Les dernières phases de cycle de vie des composants électronique

Phase	Description
Déclin	Cette phase se définit par une baisse de profit, car la perte du volume de production entraîne une augmentation du coût par unité vendue. Cette tendance se poursuit jusqu'à ce que le produit soit totalement obsolète. En conséquence, le nombre de fabricants de composants d'origine diminue, créant une offre plus limitée sur le marché.
Retrait	Dans cette phase, les derniers fabricants cessent la production et la réorientent vers d'autres composants plus adaptés à la future demande du marché. Ainsi, un avis de cessation de production (PDN : Product Discontinuance Notification) est envoyé en aval pour proposer un dernier achat et suggérer des composants de substitution pour le marché secondaire. Les composants sont généralement encore disponibles sur le marché, mais l'offre tend à se déplacer vers des sources secondaires.
Obsolescence	Dans cette phase, plus aucun composant n'est produit pour répondre à la demande des clients et pour les services après-vente. La zone d'obsolescence des composants est un fait, soit lorsque la fabrication a cessé d'en produire, soit lorsque des problèmes de fiabilité rendent le composant inutilisable pour de nouveaux produits.

Dans la théorie de l'obsolescence des composants et d'équipements électriques et électroniques, les SDS (*Sustainment Dominated Systems*) sont fréquemment évoqués dans la recherche scientifique. Ce sont des systèmes pour lesquels le coût du support et de la maintenance au cours de leur cycle de vie dépasse les coûts de fabrication et d'approvisionnement (par exemple, l'avionique et les systèmes militaires) (Mastrangelo et al., 2021; Sandborn, 2017). Ces systèmes se caractérisent par leur faible volume et leur long cycle de vie, avec des exigences strictes de fabrication et de support pendant des longues périodes ce qui les rend à très haut risque d'obsolescence (Romero Rojo, Roy, Shehab, & Cheruvu, 2012). L'obsolescence des composants électroniques est un facteur de coût important dans ces systèmes à long terme où les exigences de support et de maintenance augmentent considérablement le coût total de cycle de vie ou le coût total de possession (F. J. R. Rojo, Roy, Shehab, Cheruvu, & Mason, 2012; Zheng, Nelson, Terpenney, & Sandborn, 2013). Les faibles volumes de production des SDS et

les produits à longue durée de vie sur le terrain entraînent un faible contrôle de la chaîne d'approvisionnement des composants électroniques, ce qui augmente l'impact de l'obsolescence technologiques.

3.2.2 La gestion de l'obsolescence

La gestion de l'obsolescence est le processus qui consiste à atténuer ou à éviter l'interruption de l'approvisionnement en composants dans le cycle de vie d'un produit (Bartels et al., 2012) . Il est axé sur l'objectif ultime de minimisation des coûts. Le processus de gestion de l'obsolescence peut être structuré sur la base du cycle *Plan-Do-Check-Act* (PDCA) selon plusieurs études et recherches de différents domaines. La Figure 3.3 décrit l'adaptation de la roue de qualité PDCA à la gestion de l'obsolescence.

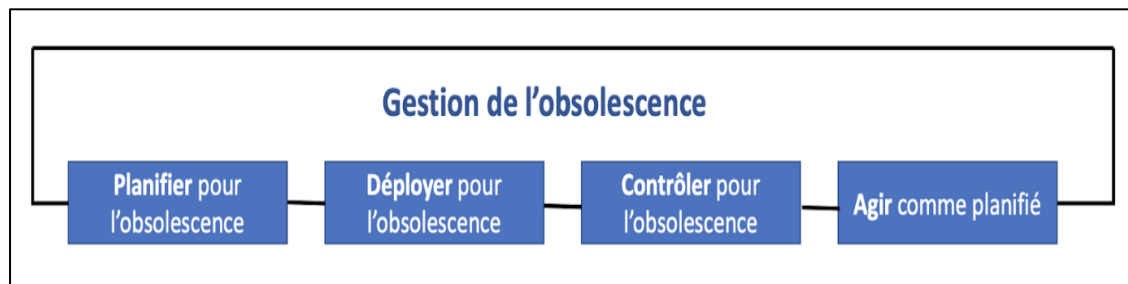


Figure 3.3 Le plan PDCA pour la gestion de l'obsolescence des composants électroniques

Une bonne gestion de l'obsolescence nécessite trois champs d'action différents : la gestion réactive, la gestion proactive et la gestion stratégique (Bartels et al., 2012). En général, le modèle actuel dans les entreprises est axé sur des activités et des mesures réactives (Bartels et al., 2012; F. J. R. Rojo, R. Roy, E. Shehab, K. Cheruvu, et al., 2012; P. Sandborn, 2013; I. Zaabar et al., 2021), gérant les problèmes d'obsolescence après avoir reçu les notifications d'obsolescence des composants. Bien que la partie réactive soit importante, minimiser les coûts liés à l'atténuation de l'obsolescence et à la durabilité des systèmes nécessite une stratégie de gestion comprenant des approches proactives et stratégiques. Pour minimiser les coûts, il est

recommandé d'utiliser une stratégie de gestion de l'organisation incluant les trois niveaux de gestion comme illustrés dans la Figure 3.4.

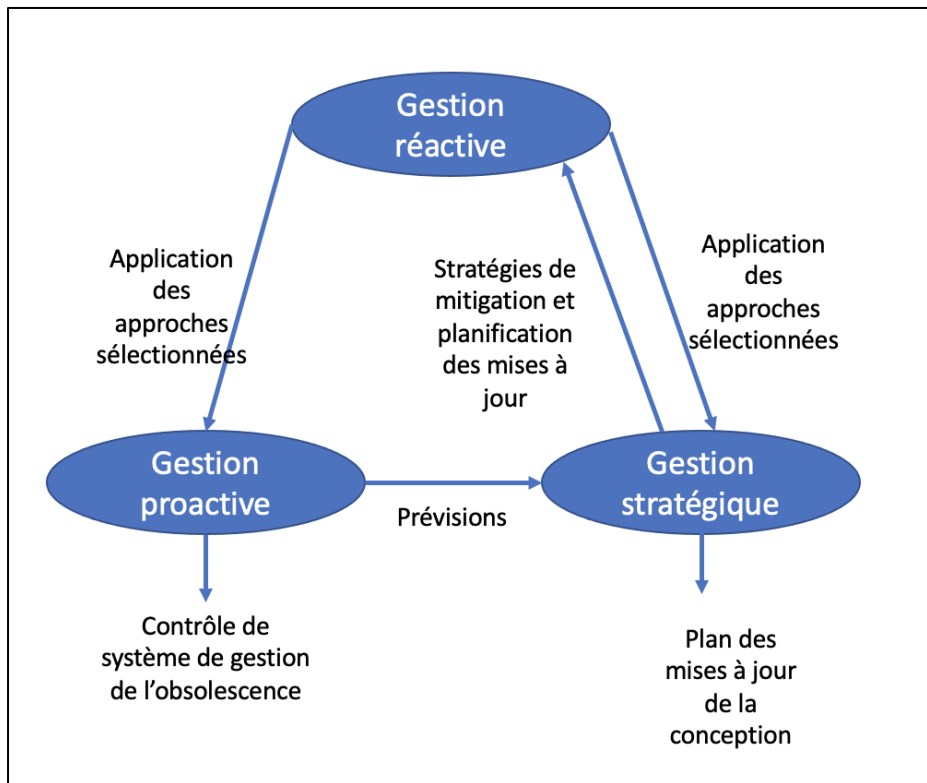


Figure 3.4 Les trois niveaux de gestion de l'obsolescence et leurs extrants

3.2.2.1 La gestion réactive

La gestion réactive de l'obsolescence est une approche visant à gérer et à atténuer à court terme le risque d'obsolescence en garantissant l'approvisionnement en composants jusqu'à ce que les engagements en matière de reconception ou de support aient été remplis. En fonction des circonstances spécifiques et des conditions préalables, telles que la durée de vie restante, le volume et la complexité, il existe plusieurs outils différents qu'une organisation confrontée à l'obsolescence peut utiliser. La gestion au niveau réactif doit être appliquée immédiatement, une fois une notification d'obsolescence est reçue, pour résoudre le problème afin de minimiser la pénurie d'approvisionnement ou la perturbation opérationnelle au sein de l'organisation. Elle

consiste à sélectionner la solution appropriée, parmi celles listées plus bas, pour le composant qui est déjà indisponible ou qui le sera dans un futur proche, suivi de l'exécution de la mesure sélectionnée et de la documentation des actions entreprises pour une évaluation rétrospective.

Table 3.1 Description des approches réactives pour le même composant

Approche réactive	Description
Négociation avec le fabricant	Une fois que les fabricants d'un composant décident de l'éliminer progressivement du marché, il est rare qu'ils soient retardés. Toutefois, si le composant obsolète est suffisamment important pour le client, il peut être possible de négocier un accord pour le produire exclusivement à un prix plus élevé si les volumes de production peuvent être garantis. Une autre alternative pourrait être proposée par le fabricant est de produire un composant de substitution ou un fournisseur de pièces de rechange pour répondre aux besoins.
Le stock existant	Il s'agit d'une approche réactive de premier niveau qui devrait être explorée, car elle est relativement peu coûteuse par rapport aux autres alternatives. L'approche consiste à sécuriser rapidement le stock du composant obsolète encore disponible dans la chaîne d'approvisionnement pour satisfaire la demande, au moins à court terme, jusqu'à ce qu'une nouvelle action soit mise en place.
Le dernier achat (Last Time Buy LTB)	Le Last Time Buy (LTB) est de se procurer un approvisionnement suffisant pour répondre aux besoins futurs pour le composant obsolète. Si le besoin couvre la durée de vie entière du produit, l'action est également appelée Life Time Buy. Il s'agit de l'une des options les plus simples pour résoudre l'obsolescence, étant donné que la réingénierie et, éventuellement, les tests de validité accompagnés peuvent être évités. La mesure LTB est généralement proposée par le fournisseur à la suite d'un PDN (Product Discontinuance Notice) afin que le client puisse combler sa demande jusqu'à ce qu'une solution permanente soit établie. Néanmoins, la mesure LTB est également associée à certains risques. Le premier dépend de la précision de la décision, il peut être très difficile d'estimer la demande à long terme et le montant du capital que l'on est prêt à bloquer en stock. Il peut également y avoir des limitations physiques sur le produit qui peuvent limiter l'utilisation de stock, car les composants peuvent avoir une date d'expiration. Il existe également des cas où le producteur ou les fournisseurs ne peuvent pas répondre aux volumes de LTB ou ont envoyé l'information trop tard pour constituer une alternative intéressante.

Approche reactive	Description
Les sources du marché secondaire	S'il n'est pas possible d'obtenir le composant en voie d'obsolescence auprès du fournisseur d'origine, une entreprise peut choisir de s'approvisionner auprès de sources secondaires pour la durée de vie restante du système. Celles-ci peuvent être soit autorisées et approuvées par le fournisseur d'origine, soit par des courtiers externes. La première solution doit être privilégiée, car les risques de contrefaçon et de problèmes de qualité sont considérables lorsqu'on s'approvisionne sur le marché secondaire.
Réclamation et cannibalisation	Cette approche consiste à réutiliser les composants déjà disponibles dans les systèmes de produits actuels. La récupération consiste à récupérer les composants des systèmes inutilisables pour les utiliser dans d'autres systèmes afin de répondre à court terme à la demande de composants. De même, la cannibalisation consiste à annuler la mise en place de la production ou du service d'un produit pour répondre aux besoins d'un autre produit jugé prioritaire. Ces mesures sont généralement utilisées dans la dernière phase en tant que dernière mesure, cependant, elles s'accompagnent de risques que les composants récupérés soient moins fiables que ceux qu'ils sont censés être remplacés.

Table 3.2 Substitution de composants et remplacement de Forme-Format-Fonctionnalité FF

Approche réactive	Description
Un composant équivalent	Un composant de substitution, est un remplacement fonctionnellement, paramétriquement et techniquement interchangeable avec le composant original sans aucun besoin de requalification. Par conséquent, le principal avantage est le coût réduit par rapport aux options telles que la reconception. Le principal inconvénient est que le remplacement par un composant équivalent est difficile en raison du critère Forme-Forme-Fonctionnalité, c'est-à-dire que le composant équivalent doit avoir la même forme, le même ajustement et la même fonction que le composant d'origine. C'est particulièrement compliqué pour les dispositifs semi-conducteurs actifs, où le logiciel intégré pourrait être affecté par les remplacements. Les composants passifs sont plus faciles à remplacer par des équivalents en raison de leur simplicité relative.
Une alternative	Est un composant de substitution qui n'a pas les mêmes performances que le composant d'origine en termes de fonctionnalité ou de qualité. Des tests sont donc souvent nécessaires, ce qui augmente les coûts.

Approche réactive	Description
Surclassement (uprating)	Il s'agit du cas où un composant est choisi pour être évalué afin de répondre à l'exigence fixée, même si la spécification du fabricant est inférieure. En d'autres termes, on utilise un composant qui, à l'origine, n'est pas destiné à l'usage souhaité. Pour l'électronique, la température est une spécification de fonctionnalité commune qui est évaluée pour répondre aux nouveaux besoins.

Émulation

Les composants d'émulation ne sont pas des composants d'après-vente, mais plutôt un substitut basé sur d'anciens composants obsolètes qui sont remis à neuf et améliorés pour une nouvelle fonction. Les données permettant de créer ou de refaire des composants pour cette nouvelle application sont généralement basées sur des fiches techniques ou des rapports d'essai pour reproduire la fonctionnalité des composants originaux. Une émulation s'applique également aux logiciels, où une interface logicielle peut permettre l'utilisation de leurs versions obsolètes.

Reconception

La reconception est une approche de la gestion réactive qui implique le développement ou la révision d'un composant obsolète pour mettre fin à son utilisation (Bartels et al., 2012; Huang et al., 2019; P. Sandborn, 2013). L'objectif principal est d'améliorer les performances, la fiabilité, le support ou la robustesse de conception des composants, en partie en permettant l'utilisation de composants plus récents. Cet objectif pourrait être atteint en appliquant une conception modulaire, ce qui permettrait d'utiliser davantage de composants standard (Jenab et al., 2014; Wilkinson, 2015; I. Zaabar et al., 2021). (Staehr et al., 2025) ont étudié l'importance de l'adaptabilité pour faire face à l'obsolescence des bâtiments. Cependant, cette option est la plus coûteuse et elle doit être envisagée en dernier recours si des mises à niveau des fonctionnalités sont nécessaires. La reconception est la plus durable des approches réactives décrites. En outre, elle pourrait être techniquement et économiquement viable lorsqu'elle est utilisée pour prolonger le cycle de vie du système ou du produit, augmentant

ainsi les bénéfiques. Les produits nécessitant une reconception sont inévitables pour les systèmes à longue durée de vie, et certains d'entre eux font généralement l'objet de reconceptions répétitives tout au long de leur durée de vie, en raison du décalage entre la durée de vie et les exigences de service des composants individuels. Par conséquent, les entreprises fournissant ces types de produits doivent disposer d'une stratégie de reconception claire pour gérer de manière efficace et rentable leurs besoins.

Facteurs à prendre en compte lors du choix d'une approche réactive

Lorsque l'on envisage d'opter pour une stratégie réactive de résolution des problèmes d'obsolescence, il est très important de prendre en considération plusieurs facteurs qui peuvent aider à la prise de décision à savoir : la date jusqu'à l'obsolescence ou l'arrêt de production se basant sur la communication avec le fournisseur via une notification de discontinuation de composant, la possibilité d'un LTB (Last Time Buy), les conditions du marché justifiant ou pas l'interruption de l'utilisation de la technologie concernée, les différentes alternatives disponibles et leurs performances en termes de technologie, impact environnemental, fonctionnalité ou encore combien de temps celle-ci rajoutera à la durée de vie du système ou produit (I. Zaabar et al., 2021).

3.2.2.2 La gestion proactive

La gestion proactive de l'obsolescence est le niveau de gestion dans lequel les composants et leurs technologies non démodés sont suivies et gérées de manière proactive avant que les problèmes liés à l'obsolescence ne surviennent (Bartels et al., 2012; L. Zheng et al., 2015). L'objectif de la gestion proactive est d'atténuer de manière proactive les risques d'obsolescence qui pourraient conduire à l'indisponibilité des composants, à des arrêts de production et à des reconceptions coûteuses, etc. La surveillance et le suivi des informations sur le cycle de vie des composants font partie de la prévision de l'obsolescence, qui est une activité principale de la gestion proactive (Mastrangelo et al., 2021; Sandborn, 2017). Autre que la prévision de

l'obsolescence, la gestion proactive doit également inclure des processus de révision et de mise à jour du statut d'obsolescence (Sandborn, 2008).

Les experts recommandent le passage de mesures réactives à des mesures proactives dans la gestion de l'obsolescence pour rester compétitif. Dans ce cas, il est très important de comprendre que les pièces, les composants et les produits différents nécessitent des niveaux de proactivité différents. Celui-ci doit être évalué sur la base d'une estimation initiale des risques, en évaluant la probabilité d'obsolescence et son impact (Zaabar et al., 2017). Par exemple, si l'impact économique est faible (en raison d'un remplacement FFF- Forme-Format-Fonctionnalité), il peut être conseillé de gérer l'obsolescence de manière seulement réactive. Si l'impact est élevé, la nécessité d'être proactif est plus forte. Lorsqu'une pièce, un composant ou un produit a à la fois un impact élevé et une forte probabilité d'obsolescence, il peut être classé comme critique et les mesures proactives doivent être privilégiées (Rojo et al., 2012).

Un facteur clé limitant, dans la gestion proactive et la prévision d'obsolescence est les ressources dédiées dans une entreprise pour effectuer cela (Bartels et al., 2012). Étant donné qu'une entreprise ne pourra pas disposer des ressources nécessaires pour gérer de manière proactive tous les composants et produits, il est nécessaire d'identifier et de hiérarchiser les composants critiques. La criticité d'un composant est basée sur le risque de devenir obsolète, la disponibilité après l'obsolescence et son impact lorsqu'il deviendra obsolète. Afin de concentrer les ressources et de décider du niveau de proactivité nécessaire, il faut définir des responsabilités et un processus pour le modèle de gestion proactive. En plus de la rareté d'expérience, en général, en gestion d'obsolescence, il y a un manque de collaboration entre les équipes de la gestion d'obsolescence et les autres structures de l'entreprise tels que la gestion des projets, la planification, le suivi et le contrôle de la qualité. Les experts recommandent la participation à un conseil de gestion de l'obsolescence de différentes fonctions et départements dans le processus proactif de gestion de l'obsolescence afin de fournir des connaissances expertes dans différents domaines. Les étapes clés pour un processus proactif efficace de gestion de l'obsolescence sont, selon la norme IEC62402 :2019 (IEC, 2019) :

1. Sélection des composants/modules/produits
2. Analyse des risques
3. Hiérarchisation
4. Sélection des composants critiques
5. Surveillance de la disponibilité
6. Initiation de la gestion réactive
7. Redéfinition des priorités

La première étape de sélection des composants, modules ou produits à privilégier est une décision stratégique liée au facteur limitant des ressources rares. Lorsque la sélection initiale des composants ou des produits est effectuée, une analyse des risques d'obsolescence est réalisée sur l'ensemble de la nomenclature. Sur la base des données de l'analyse initiale des risques, il convient d'établir un ordre de priorité des composants nécessitant un plan de gestion proactive de l'obsolescence. Les composants critiques doivent ensuite être sélectionnés et leur disponibilité doit être contrôlée. L'initiation d'une approche réactive se réfère aux mesures réactives lancées lorsque les composants non choisis pour les mesures proactives deviennent obsolètes et nécessitent une résolution. La dernière étape de la redéfinition des priorités met en évidence la nécessité d'une mise à jour continue de la sélection et de la hiérarchisation des composants, des produits et des pièces devant faire l'objet d'un suivi de l'obsolescence et d'un plan de gestion réactive.

Prévision de l'obsolescence

La prévision de l'obsolescence vise à informer sur la disponibilité future, les alternatives possibles et l'approvisionnement des composants. L'analyse des risques fournit des informations sur les composants telles que la prévision de la disponibilité et de la date de l'obsolescence, l'identification des risques, et donne un état de santé global du système. Bien que l'analyse du risque d'obsolescence et la prévision de l'obsolescence soient importantes tout au long du cycle de vie d'un produit, une analyse initiale est vitale pour éviter l'inclusion

de composants obsolètes ou bientôt obsolètes dans la conception finale (Bartels et al., 2012). La gestion proactive et l'analyse des risques d'obsolescence doivent commencer tôt dans la phase de conception, avant que le processus de qualification n'ait commencé, afin d'éviter les coûts inutiles liés à la requalification. Lors de la prévision de l'obsolescence, la technique la plus courante dans les entreprises consiste à utiliser les nomenclatures des produits afin d'éviter la sélection de composants obsolètes présentant un risque imminent d'obsolescence (Zheng et al., 2013). La gestion des nomenclatures peut se faire de plusieurs façons, mais les approches communes sont l'utilisation d'outils commerciaux et de bases de données. De nombreuses compagnies gérant l'obsolescence de manière proactive mettent en œuvre des outils commerciaux qui permettent de surveiller toute la nomenclature. De même, les bases de données en ligne peuvent être utilisées de manière similaire en téléchargeant des listes de nomenclatures et en recevant des informations pertinentes sur l'obsolescence. De plus, des boîtes de conseil proposent aujourd'hui des solutions de gestion de l'obsolescence de A à Z.

Les résultats de l'analyse du risque d'obsolescence doivent être résumés et compilés dans un indice de risque. Parmi les indices, on trouve l'indice du risque matériel (IRM), qui est souvent fourni par l'outil ou la base de données (Bartels et al., 2012; Singh & Sandborn, 2006). Cet indice est un score décrivant le niveau de risque d'obsolescence pour chaque composant de la nomenclature. En général, l'indice classe un composant dans la catégorie rouge s'il est obsolète ou recommandé pour une reconception, orange si la disponibilité future ne répond pas aux exigences ou s'il s'agit d'une source unique, bleu si aucune information n'est disponible et vert si aucun risque n'est identifié (Bartels et al., 2012). Pour obtenir une gestion proactive efficace, les informations provenant des prévisions et de l'analyse des risques doivent être à jour. Réaliser régulièrement l'analyse des risques et les prévisions équivaut à suivre la disponibilité des composants. La fréquence du suivi de la disponibilité des composants dépend du besoin de surveillance. Si un produit ou une pièce comprend des composants critiques, l'analyse des risques et les prévisions d'obsolescence doivent être effectuées plus fréquemment. Si un produit ou une pièce ne comporte pas de composants critiques, l'analyse des risques et la prévision de l'obsolescence peuvent être effectuées moins souvent.

3.2.2.3 La gestion stratégique

La gestion stratégique de l'obsolescence est utilisée en plus de la gestion réactive et proactive et implique la planification et l'optimisation de l'utilisation de différentes approches d'atténuation de l'obsolescence pour minimiser le coût du cycle de vie tout en répondant aux exigences fonctionnelles fixées (Meng et al., 2014; Nelson & Sandborn, 2012). Ce niveau de gestion consiste à utiliser les données disponibles sur les technologies et les prévisions d'obsolescence ainsi que les données de la chaîne d'approvisionnement pour permettre la planification stratégique et l'optimisation du cycle de vie. L'une des conditions préalables pour réussir à atténuer l'obsolescence est de développer des plans et des processus efficaces tout au long du cycle de vie dans la conception, la production et le support après-vente.

La gestion réactive est un outil important pour gérer une situation d'obsolescence non planifiée et est indispensable dans une organisation. Cependant, elle peut s'avérer très coûteuse sur la durée de vie d'un produit, sans compter le risque de ne pas pouvoir gérer l'indisponibilité des composants. Ainsi, la gestion stratégique est nécessaire pour éviter l'obsolescence dès la conception. Le moyen le plus efficace d'atténuer l'obsolescence est de la prévoir dès la première phase de conception et d'empêcher ainsi l'effet de la cause plus tard dans le cycle de vie. En outre, l'accent est mis sur la prise en compte des changements rapides de composants afin de rationaliser les processus de conception et de production pour limiter efficacement l'obsolescence et les coûts associés (Bartels et al., 2012). Shivankar & Deivanathan, 2025 reconnaissent que tout retard dans la phase de mise en œuvre du changement augmente le coût de l'obsolescence et augmente les risques de défaillance de la qualité des produits. L'approche stratégique s'articule autour de l'élaboration d'une analyse de rentabilité de l'obsolescence où la gestion de projet est appliquée pour faciliter le processus. Le processus stratégique est structuré et formulé dans les quatre étapes suivantes :

1. Étape d'initiation : est établie pour définir le problème analyser la situation actuelle. Cette étape implique la création d'une base de connaissances sur l'obsolescence en vérifiant les conditions au sein de l'organisation, en plus de la sensibilisation aux risques possibles.

2. Étape de planification et de conception : elle implique l'évaluation et les décisions visant à identifier les risques, les causes et les conséquences liés à l'obsolescence. Ces données sont utilisées pour élaborer un plan d'obsolescence stratégique. Cette phase vise à sensibiliser les développeurs de produits à l'importance de la conception dans la gestion de l'obsolescence qu'on appelle la conception pour l'obsolescence.

3. Phase d'exécution : Cette étape concerne l'exécution des actions, les opérations stratégiques et le processus de gestion de l'obsolescence. Elle consiste à effectuer des prévisions sur le cycle de vie du produit, en collaboration avec la planification, et à évaluer en permanence la satisfaction des besoins et la capacité de support dès la conception et tout au long de la durée de vie restante. Il s'agit d'effectuer une évaluation des risques liés aux composants afin d'éviter l'obsolescence et de recevoir des alertes rapides en cas d'obsolescence imminente. La planification de l'actualisation de la conception (*Design Refresh Planning*) est applicable pour gérer efficacement les ajustements de la conception et pour minimiser les ressources et les tests nécessaires, qui induisent des coûts élevés. Un exemple d'un plan dans lequel la planification des actualisations de la conception est combinée à d'autres actions d'atténuation de l'obsolescence est présentée dans la Figure 3.5. Une autre action pour atténuer stratégiquement l'occurrence de l'obsolescence consiste à mettre en œuvre un processus de sélection des composants au stade de la conception, par exemple une liste de composants préférés, afin de clarifier quels composants peuvent être utilisés. De cette façon, la sélection est optimisée pour garantir une utilisation à long terme. Cependant, un tel processus exige une collaboration élevée avec les fournisseurs pour assurer la disponibilité et l'approvisionnement. La gestion efficace des fournisseurs est, alors, un aspect essentiel de la gestion efficace de l'obsolescence. La clé est de s'assurer que les avis de modification de pièces (PCN : *Product Change Notification*) et les avis d'arrêt de production de pièces (PDN : *Product Discontinuance Notification*) pertinents parviennent à l'entreprise à temps pour être traités en conséquence. La gestion de la relation avec les fournisseurs est nécessaire pour assurer une communication efficace et clarifier les responsabilités convenues entre le fournisseur et le client. Les politiques des contrats peuvent, quant à elles, atténuer l'obsolescence en donnant aux fournisseurs la

responsabilité de la résolution des problèmes, y compris le partage des coûts et des ressources. Enfin, les fournisseurs peuvent assurer la disponibilité des composants, la sécurisation des stocks ainsi que le support de maintenance pour le client. Les accords de partenariat sont recommandés pour assurer un support et un approvisionnement continus des composants. Les experts suggèrent l'utilisation de composants standardisés et la modularisation de l'architecture du système ou du produit. Si elle est viable, c'est un excellent outil pour minimiser l'impact de la reconception du système.

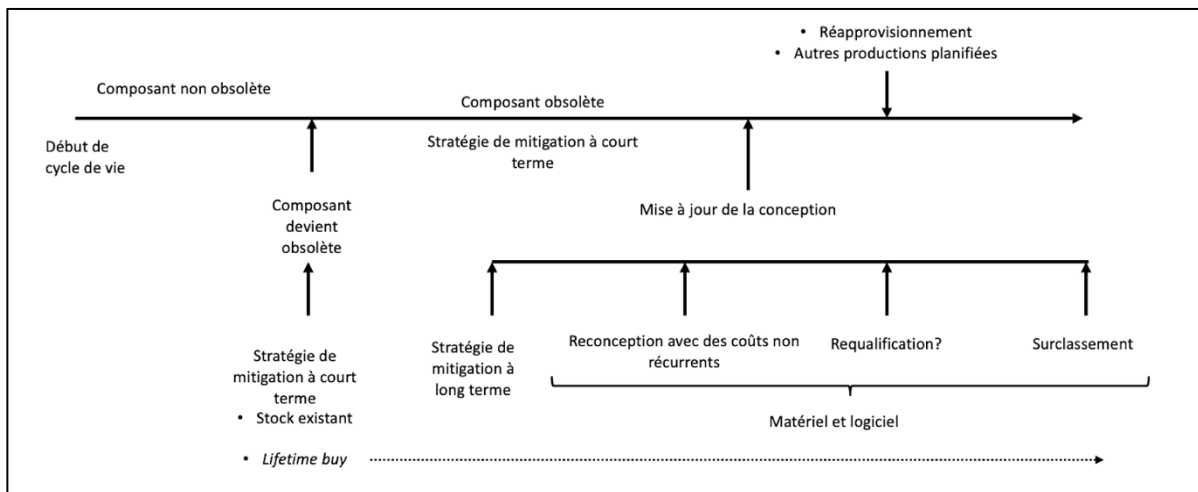


Figure 3.5 Processus de planification de la mise à jour de la conception

4. Étape de suivi et de contrôle : Cette étape vise à définir, analyser et évaluer le coût de la gestion de l'obsolescence. L'approche consiste à évaluer leur rapport coût-efficacité, c'est-à-dire le bénéfice net qui pourrait être obtenu en déterminant la valeur de sortie des avantages par rapport à la valeur d'entrée des coûts.

3.2.3 Les modèles de prise de décision en gestion de l'obsolescence pour les produits à long cycle de vie

La première tentative pour aider les décideurs dans la gestion de l'obsolescence est une approche basée sur l'analyse économique (Porter, 1998). Une formulation de la valeur actuelle nette de l'achat de dernière minute LTB et de la planification de rafraîchissement de la

conception a été fournie. Elle aide les ingénieurs en obsolescence à trouver le meilleur compromis entre le LTB et la reconception. Ce modèle permet un seul rafraîchissement/mise à jour de la conception à la fois. La stratégie du dernier achat (LTB) est largement étudiée en raison de son utilisation courante en pratique (Hu & Bidanda, 2009). Une liste de éléments à considérer dans le calcul des coûts a été développé également (Feng et al., 2007). Il s'agit des coûts d'approvisionnement, d'inventaire et de pénalité. Pour la résolution des modèles mathématiques développés, la programmation mixte en nombres entiers a été utilisée pour l'obsolescence des pièces dans un problème de dimensionnement de lot à deux niveaux (Acevedo-Ojeda et al., 2020). Le rafraîchissement de la conception a également été bien étudié. Un modèle développé dans la référence Singh & Sandborn, 2006 est basé sur l'analyse des coûts et fournit le plan optimal de rafraîchissement de la conception afin d'atteindre le coût optimal de maintenir le produit en vie. Il optimise le coût sur plusieurs rafraîchissements de conception.

L'évolution de cycle de vie du produit a été simulée en utilisant la programmation dynamique stochastique pour prendre des décisions avec un processus de décision de Markov (Kumar & Saranga, 2010). De nombreuses autres études ont tenté de résoudre le problème de l'obsolescence en utilisant différentes techniques telles que la programmation en nombres entiers (Zheng et al., 2015), la théorie des graphes et la programmation linéaire mixte (Meng et al., 2014). La limite des recherches précédentes est qu'elles sont axées sur les coûts et qu'elles ne considèrent que deux stratégies de résolution (le LTB et la reconception) parmi tous les profils de résolution possibles, ignorant ainsi la dimension durable du problème. D'autres études ont considéré l'obsolescence comme un critère dans le processus de décision de nombreux problèmes tels que l'entretien du réseau d'eau potable et d'égouts (Werey et al., 2018), pour l'évaluation de l'obsolescence des logiciels (Bowlds, Fossaceca, & Iammartino, 2018) et dans le problème de l'achat de matériel (Bowlds et al., 2018) où l'auteur a considéré l'obsolescence technologique et a développé un modèle bi-objectif pour aider les gestionnaires dans leurs décisions en déterminant une quantité à commander écologique et durable pour atténuer l'impact de l'obsolescence technologique ce qui pourrait relever les défis en terme d'environnement et de développement durable.

3.3 L'obsolescence des équipements électriques et électroniques et les enjeux environnementaux

Au cours du dernier siècle, les équipements électriques et électroniques, et l'industrie qui les produit, ont contribué à favoriser le bien-être, la croissance économique et la création d'emplois partout dans le monde. L'innovation dans les technologies de communication, d'entretien ménager et d'affichage, entre autres, a révolutionné notre mode de vie. Dans le même contexte, les informations sont distribuées et partagées plus rapidement que jamais auparavant. Si l'on tient compte du parc d'équipements électriques et électroniques dans les ménages, les entreprises et les espaces publics, une personne en Europe, par exemple, possède en moyenne 44 appareils de ce type. Un exemple de l'énorme quantité d'équipements électriques et électroniques produite chaque année est celle des équipements connectés à Internet, qui sont désormais plus nombreux que les humains sur la planète. Ce phénomène est accéléré par l'obsolescence de composants électroniques et créant ainsi un grand flux de déchets électriques et électroniques. Il est très important, dans le cas des petits équipements électriques et électroniques de mentionner que l'obsolescence peut être programmée comme spontanée, cela dépend de plusieurs facteurs tels que la technologie, l'éthique de fabricant, mais aussi de la psychologie du consommateur. Cet exemple est très différent de l'obsolescence des systèmes à cycle de vie long et les SDS ou l'obsolescence est spontanée et non désirée ni par l'utilisateur ni par le fournisseur. La perception du risque de l'obsolescence n'est donc pas la même et la gestion dans les deux cas de figures est donc différente. Simplement, le monde fait face au même phénomène qui génère les mêmes conséquences néfastes surtout en termes d'environnement et de durabilité.

Dans cette section, la tendance de production et de consommation ainsi que l'obsolescence des équipements électriques et électroniques sont étudiées en mettant l'accent sur le flux des déchets électriques et électroniques.

3.3.1 La tendance en production

L'industrie électrique et électronique est l'une des plus importantes et des plus compétitives en Europe et dans le monde, produisant des composants et des pièces pour différents secteurs. Dans l'UE, la fabrication d'équipements électriques et électroniques employait plus de 2,5 millions de personnes en 2017 dans 86 200 entreprises, pour un chiffre d'affaires d'environ 705 000 millions d'euros. Le secteur connaît une croissance régulière depuis 2012, dans certains cas en termes de nombre de salariés et dans d'autres en valeur et/ou en volume de production (Bachér et al., 2020). De même, aux É.U, la fabrication des équipements électroniques compte plus de 5,3 millions d'emploi en 2020, dont 1.3 millions d'emploi direct, représentant 4% du PIB du pays (IPC, 2020).

La production d'équipements électriques et électroniques est fortement mondialisée et devrait continuer à croître. Parmi les principaux moteurs de la croissance de la consommation d'équipements électriques et électroniques figurent l'adoption de l'intelligence artificielle, l'utilisation accrue de produits mobiles, sans fil et connectés, ainsi que les cycles de remplacement courts et la baisse des prix de nombreux appareils en raison de la forte concurrence. Pour les fabricants, l'essentiel résidera dans leur capacité à adapter leurs produits à l'aide de nouvelles technologies propres et axées sur les données.

La Figure 3.6 montre la quantité d'équipements électriques et électroniques sélectionnés mis sur le marché entre 2011 et 2017 en Europe. Elle a baissé en 2013, mais a ensuite augmenté globalement de 19 %. Le gros électroménager est la catégorie dominante, représentant 52 % du total, suivi par les technologies de l'information (TI) et les équipements de télécommunication, 11 % ; les équipements grand public et les panneaux photovoltaïques, 10 % ; et le petit électroménager, 9 %. Seule la catégorie, des équipements informatiques et de télécommunication, a enregistré une baisse au fil du temps, -4% de kilogrammes par personne (kg/personne) depuis 2013, probablement en raison de la diminution de la taille des équipements informatiques personnels, par exemple, les ordinateurs de bureau ont été remplacés par des ordinateurs portables et des notebooks (Bachér et al., 2020).

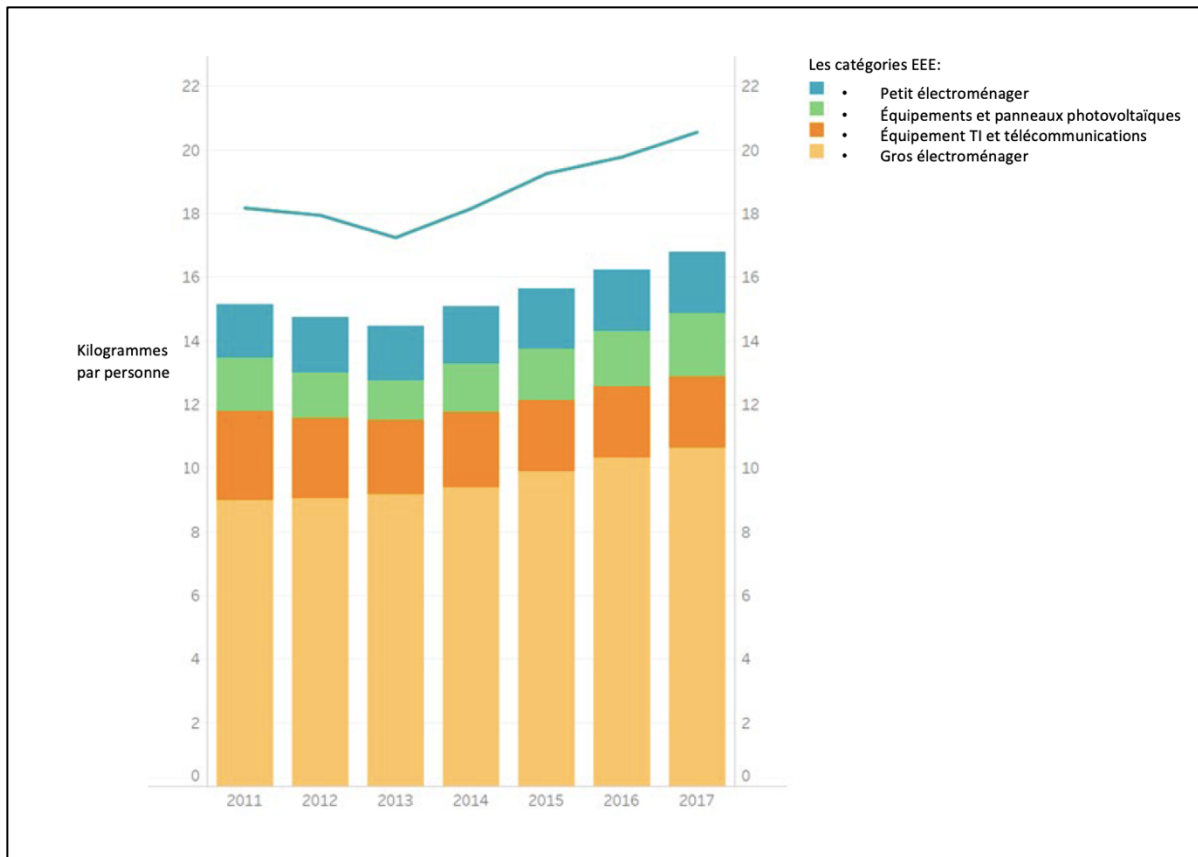


Figure 3.6 Quantité d'équipements électriques et électroniques sélectionnés mis sur le marché entre 2011 et 2017 en Europe

L'U.E seule a importé en 2017 plus de 4,5 millions de tonnes ou 8,8 kg/personne d'équipement électronique, et a exporté 1,2 million de tonnes ou 2,4 kg/personne. Récemment, le stock d'équipements électriques et électroniques au sein de l'UE a été estimé à 128 millions de tonnes, soit environ 244 kg/personne, dont un peu moins de 67 % de gros et petits appareils ménagers tels que des machines à laver et des machines à café, 21 % d'équipements de refroidissement et de congélateurs, 7 % d'écrans, 5 % d'équipements informatiques et environ 0,4 % d'éclairage (Bachér et al., 2020).

En 2018, 38 % de tous les appareils ménagers commercialisés dans le monde ont été produits en Chine, 31 % en Europe, 19 % en Amérique du Nord et le reste au Japon, en Russie et en Corée. Le secteur est toutefois constamment soumis à des défis tels que la concurrence accrue

d'autres économies asiatiques en pleine croissance. En outre, l'accord de Paris sur le changement climatique et l'introduction de nouvelles technologies, telles que l'intelligence artificielle et la robotique, façonnent le marché à l'échelle mondiale (APPLiA, 2018).

3.3.2 La tendance de consommation

On trouve des équipements électriques et électroniques dans presque tous les ménages et les consommateurs achètent régulièrement de nouveaux appareils.

Si l'on considère la consommation totale d'équipements électriques et électroniques dans l'UE en 2017, les dépenses des ménages en équipements électriques et électroniques se sont élevées à 421 milliards d'euros - avec environ 221 millions de ménages dans l'UE, cela représente 1 900 euros par ménage (Bachér et al., 2020). Sur la consommation totale d'équipements électroniques et électriques, 50 % concernaient des produits de communication tels que les téléphones mobiles, 26 % des équipements audiovisuels, photographiques et de traitement de l'information tels que les ordinateurs portables, 16 % des appareils ménagers et, enfin, 8 % des outils et équipements pour la maison et le jardin.

Par rapport au logement, au transport et à l'alimentation, les dépenses des ménages de l'UE en équipements électriques et électroniques sont relativement faibles - environ 5% des dépenses totales des ménages en 2017. Si la part des équipements électriques et électroniques dans les dépenses totales est stable dans le temps, elle était de 5,7 % en 2009 puis de 5,4 % en 2012, le montant total de tous les équipements électriques et électroniques consommés est en augmentation. Aux É.U, cette industrie fait plus 1000 milliards de dollars de ventes finales, répartis entre les investissements des entreprises et la variation des stocks (426,6 milliards de dollars), la consommation personnelle (306,5 milliards de dollars), les exportations (223,9 milliards de dollars), la défense fédérale (37,8 milliards de dollars) et les autres dépenses publiques (48,1 milliards de dollars) (IPC, 2020).

Une raison de cet engouement pour le marché est la perception générale d'une diminution de la durée de vie des produits électriques et électroniques qui se rajoute au vrai problème d'obsolescence des équipements électroniques. Au fil du temps, la conception des produits est devenue plus complexe et les appareils sont de plus en plus difficiles à réparer. Compte tenu du plan d'action pour l'économie circulaire et de l'intention d'adopter une économie circulaire, il existe un besoin croissant de produits plus durables, faciles à réparer, à réutiliser ou à recycler. La directive sur l'écoconception couvre déjà les impacts environnementaux tout au long du cycle de vie des produits, mais l'accent a été mis jusqu'à présent sur l'amélioration de l'efficacité énergétique. Le nouveau règlement sur l'écoconception [UE 2019/1784] contribue également à la transition vers une économie circulaire en incluant des exigences en matière de réparabilité et de recyclabilité des équipements électriques et électroniques.

3.3.3 L'obsolescence des composants électriques et électroniques : les déchets EEE et l'environnement

L'impact des déchets des équipements électriques et électroniques sur l'environnement et le climat sont en grande partie liés à leur durée de vie et par la suite à leur obsolescence programmée ou spontanée. La durée de vie diffère d'un produit technologique à un autre, par exemple, celle d'un téléphone portable est généralement plus courte que celle d'un lave-linge, elle est en fonction de plusieurs facteurs, notamment le pays, la qualité, la durabilité des composants et la disponibilité des services de réparation. Pour cela, il est difficile de dire que l'obsolescence des équipements technologiques produits en masse est uniquement programmée ou est plutôt spontanée. Toutefois, un appareil n'est pas nécessairement non fonctionnel à la fin de sa vie. Cela peut être le cas lorsque la durée de vie dite utile est terminée, par exemple, en raison de la sortie d'un nouveau modèle plus désirable et aux spécifications améliorées.

La production d'équipements électroniques et électriques est cependant une industrie à forte exploitation de ressources. Un téléphone, par exemple, peut contenir jusqu'à 60 éléments différents du tableau périodique. Certains d'entre eux figurent sur la liste des matières premières critiques de la Commission européenne, qui sont d'importance économique et

stratégique, mais qui présentent des risques d'approvisionnement élevés. L'extraction, la récupération et le raffinage des matériaux pour les équipements électriques et électroniques consomment beaucoup de ressources et de grandes quantités d'eau, de produits chimiques et d'énergie. De même, la production et la fabrication des équipements électriques et électroniques nécessitent également de l'énergie dans leur phase d'utilisation. La contribution des différentes phases du cycle de vie des équipements électriques et électroniques au réchauffement de la planète varie considérablement d'un produit à l'autre. Pour certains produits de haute technologie et à courte durée de vie, tels que les téléphones mobiles, l'énergie nécessaire à la production peut représenter jusqu'à 85 à 95 % du cycle de vie d'un appareil (Belkhir & Elmeligi, 2018).

En plus de son exploitation excessive des matières premières et de l'énergie, les équipements et composants électriques et électroniques à leur obsolescence ou la fin de leur vie utile représentent la plus grande contribution dans les déchets électronique. Ses quantités sont estimés à 53.6 millions de tonnes en 2019 contre 44.7 millions de tonnes en 2016, donc une augmentation officielle de 8.9 millions de tonnes en 3 ans (Forti et al., 2020). La Figure 3.7 donne un aperçu sur la provenance de ces déchets et leur répartition selon les continents.

L'impact environnemental de ces déchets sur la planète est néfaste à cause des matières toxiques qu'ils contiennent et l'inconscience du grand public de leur danger. Les pays et les organisations mondiales ont mis en place plusieurs politiques, restrictions et réglementations environnementales pour gérer la production des composants et produits électroniques ainsi que leurs déchets. On trouve la restriction sur les substances dangereuses (RoHS) et l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et la restriction des produits chimiques (REACH). La directive RoHS concerne la majorité des composants et des produits électroniques, et un exemple de cette directive est la façon dont elle limite l'utilisation du plomb (Pb), qui était courant dans les composants électroniques (Bartels et al., 2012). D'autres tentatives de tri et de recyclage ont fait l'objet d'un accord mondial comme la convention de Basel en 1989, qui regroupe 175 pays depuis 2011. Simplement, 82.6 % du flux des déchets électroniques passe

par des canaux informels et est jeté dans la nature surtout dans les pays en développement comme l'Inde, la Chine, le Nigéria et le Ghana (Awasthi et al., 2019; Bachér et al., 2020).

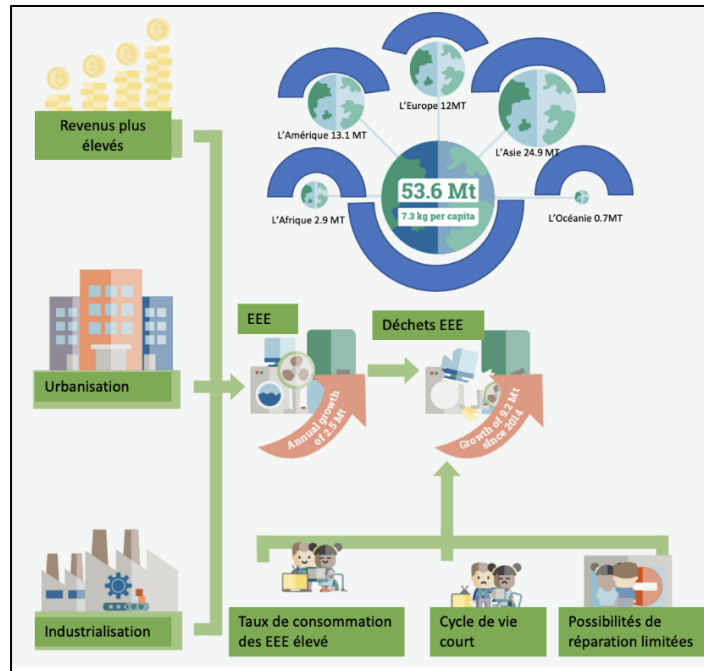


Figure 3.7 Provenance des déchets électriques et électroniques et leur répartition selon les continents

3.4 Conclusion

Le risque d'obsolescence est étroitement lié aux préoccupations environnementales telles que les déchets électroniques et l'utilisation de matériaux rares, ainsi qu'à de multiples autres aspects tels que les questions économiques et financières. La durabilité n'est pas considérée comme une tâche facile, car elle implique des niveaux élevés de gestion d'entreprise, de production et de consommation par la société. En ce sens, la pression écologique, sociale et économique s'accroît dans les entreprises, car la pollution qu'elle génère a atteint des niveaux jamais notés auparavant.

Lorsqu'on l'associe au phénomène de l'obsolescence, la fabrication de nouveaux équipements électriques et électroniques grand public a des répercussions sur l'environnement et le climat,

comme les gaz à effet de serre et les déchets. Il est évident que l'augmentation de la durée de vie des produits est essentielle pour promouvoir une consommation et une production durables et écologiques. Il existe plusieurs options pour relever ce défi, à savoir des modèles de l'économie circulaire, l'éco-conception, ou encore les mesures et lois limitant les pratiques non écologiques. Ces options doivent désormais faire partie du processus de prise de décision pour garantir un usage conscient et durable de la technologie mise à notre disposition.

CHAPITRE 4

EVALUATION AND VALIDATION OF A MATURITY MODEL IN OBSOLESCENCE MANAGEMENT FOR INCREASED PERFORMANCES

Imen Zaabar^{a *}, Yvan Beaugard^a and Marc Paquet^b

^a École de Technologie Supérieure, Département de génie mécanique, 1100 Rue Notre Dame
O, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

^b École de Technologie Supérieure, Département de génie des systèmes, 1100 Rue Notre
Dame O, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

Article présenté à la conférence ASEM, Octobre 2017

Résumé

Cet article vise à améliorer et valider un modèle de maturité en gestion de l'obsolescence. Basé sur une analogie avec la gestion de projet, cet outil permettra aux gestionnaires de mesurer le niveau de maturité de leur entreprise, ainsi que leurs fournisseurs, en matière de gestion de l'obsolescence, dans une optique d'amélioration continue. L'obsolescence représente un enjeu majeur, notamment pour les systèmes à long cycle de vie tels que l'avionique, en raison des conflits de cycle de vie : ces systèmes sont conçus pour durer des décennies, tandis que certains de leurs sous-systèmes, équipements ou composants ont des cycles de vie plus courts, ce qui accroît leur vulnérabilité et leur exposition au risque d'obsolescence au fil du temps. Ce risque impacte non seulement la qualification, la maintenance et la disponibilité du produit final, mais aussi les capacités de l'entreprise, la performance de sa chaîne d'approvisionnement et sa compétitivité. D'après notre expérience et la littérature existante, les activités de gestion de l'obsolescence sont diversifiées et les entreprises peinent à évaluer l'efficacité et l'efficacités de leurs systèmes de gestion de l'obsolescence. Ce travail contribue à la validation d'un modèle de maturité standard afin d'aider les gestionnaires à optimiser leur système de gestion de l'obsolescence grâce à une méthodologie de recherche-conception. L'évaluation et la validation ont été réalisées au moyen d'études de cas et d'enquêtes de satisfaction, constituant les deux dernières étapes de la recherche-conception. Le principal résultat de cet article est un modèle

de maturité amélioré et validé. Il décrit les différents processus à mettre en œuvre pour évaluer le niveau de maturité des entreprises et recommande ensuite des mesures pour un niveau supérieur si nécessaire afin de soutenir et de promouvoir l'amélioration des pratiques de gestion de l'obsolescence.

Abstract

The paper aims to improve and validate a maturity model in obsolescence management. Based on an analogy with a project management, the tool will allow managers to measure their companies' maturity level in obsolescence management for continuous improvement. Obsolescence becomes a big issue especially for systems with long life cycles such as avionics because of lifecycle conflicts: these systems are made to last for decades while some of their sub-systems, equipments or components have shorter lifecycles so their vulnerability and risk exposure to obsolescence becomes higher within time. The risk impacts not only the final product qualifications, maintenance and readiness but also the company's capabilities, its supply chain performances and competitiveness. Based on our experience and literature, obsolescence management activities are diversified and companies are unable to know how far their obsolescence management systems are efficient and effective. This work contributes to the validation of a standard maturity model to help managers to enhance their obsolescence management system using design research methodology. Evaluation and validation were performed via case studies and satisfaction surveys as the final two steps in design research. An improved and validated maturity model and is the principal result of this paper. It describes different processes to implement, measure companies' maturity level and then recommend steps for higher level if required to support and promote improvement in obsolescence management practices.

Keywords: Technological obsolescence, Obsolescence management, DMSMS, maturity model.

4.1 Introduction

Because of the rapid technological growth in all fields especially electronics, companies suffer today from a big issue called technological obsolescence. With a high production volume or a low one, obsolescence continues to occur and increases extensively and severally. It can be defined as the loss, or impending loss, of the manufacturers or suppliers of items or raw materials (Tomczykowski, 2003). A more realistic working definition of obsolescence was given by (Bartels et al., 2012), it is when a part (material or technology) that is needed to manufacture or support a product or a system is not available from existing stock or the original manufacturer of the part (material or technology). Systems and components obsolescence has several reasons: the technological development (Feldman & Sandborn, 2008), the disappearance from the market of the Original Component Manufacturer (OCM) for different reasons, the disruption of production by the Original Component Manufacturer (OCM) or the Original Equipment Manufacturer (OEM), the chemical or physical aging processes in storage that can destroy parts or make them useless (Bartels et al., 2012).

The issues of obsolescence go beyond aging military systems, considered as the most vulnerable systems to obsolescence. The problem is increasing dramatically in severity. More and more industries are facing a pace of technological innovation moving faster than product life cycles (Gravier & Swartz, 2009). They find themselves spending a lot of money on obsolete components replacement thus the cost of the product goes in exponential increase. It is a serious threat for systems and organizations as well. That modern risk impacts obsolete system performances as well as organizations capabilities and, managing it still a huge challenge for different firms from different sectors. The management process includes internal and external actors from different departments of a company: purchase, production, manufacturing, design, maintenance to the stakeholders, the suppliers and the customers. However, many studies focus on the technical side of the phenomenon from a system perspective: on the systems performances side like readiness, maintenance, availability after a replacement event or an upgrade, on the economic side by studying the impact of each replacement option on the TCO (Total Cost of Ownership) (Prabhakar & Sandborn, 2012) and

other costs and on the preventive side like upgrade dates, forecasting and design refreshes... There is only a very small stream of studies that treat the problem from the organization perspective (Zaabar et al., 2016). The management of part obsolescence includes part lifecycle characterization, part obsolescence forecasting, product deletion and lifecycle planning (Yuelin & Willems, 2014) but also communication, investment on the adequate tools and qualified staff... The management process includes, ideally, three management levels: proactive management, reactive management and strategic management (Bartels et al., 2012; Sandborn, 2013). These management levels were cited in many references but have never been studied as full processes to implement and to enhance obsolescence management. When it occurs, different resolution and replacement strategies are available depending on information gathered. These strategies were well defined by (Livingston, 2000) so the decision maker can choose between several solutions: the lifetime buy, the bridge buy, the part substitution, the alternate supplier, the after-market solution, the line redesign or the design refresh, the emulation or the prating. The choice depends on various parameters such as the total cost of ownership, Product's lifecycle extension ... etc. (Yuelin & Willems, 2014). The traditional approach for managing obsolescence was reactive in nature and focused on optimization techniques that minimize the cost of resolving the problem of parts going out of production, prompting a call to develop proactive obsolescence management strategies (Singh & Sandborn, 2006). In this tense environment, obsolescence management processes efficiency and effectiveness are tested not only to make the optimal decision and ensure a minimum cost but also to have visibility about the impact on organization and its performances, foresee risk and to be well prepared for it. All this can be achieved by monitoring best practices and recommendations from literature (Rojo et al., 2012b), technical reports (Wilkinson, 2015) and international standards (Commission, 2007) so the organization can develop and achieve a certain maturity in obsolescence management. Practices and obsolescence management processes are too diversified and based on the firms' experience and background. It is important for managers to know how well they are dealing with the risk and keeping competitiveness compared to competitors. The research question asked was: how can we help organizations to know how well they are dealing with obsolescence risk comparing to their competitors and their own goals?

In this context, we improved and validated a maturity model specific to obsolescence management to help them measuring their OM (Obsolescence management) maturity levels and comparing with other organizations for continuous improvement and sustainability.

Rojo et al., 2012 carried out a qualitative research approach to develop an obsolescence management capability assessment framework for the UK Ministry of Defense. It is called TOMCAT (Total Obsolescence Management Capability Assessment Tool). The main goal was to help the MoD to know the capability of its contactors in obsolescence management and support their improvement. A set of 25 metrics divided into eight key elements considered as follows: obsolescence management governance; supplier; design for obsolescence; risk assessment; obsolescence monitoring; communication; and obsolescence resolution process, was developed. The output of this tool is a score of each metric (percentage) that can help the MoD to have a better understanding of contractor's capability. That is the only empirical and practical work identified in the literature. The TOMCAT has many limitations. First, it is the MoD property and its acquisition is restricted. Second, it is an external test by a third part organization while the maturity measurement tool proposed here can be part of the self assessment and can be used in internal for self assessment. It doesn't give a level of maturity and doesn't propose an improvement plan. It gives only scores and the user can interpret it subjectively. Therefore, our motivation was the development of an accessible and adaptable maturity measurement tool to ensure competitiveness and efficiency on one hand and suggest practices and improvements for higher maturity level and higher performances on the other hand. The tool suggested in this paper adopts also the ISO 9001 philosophy of continuous improvement as well as obsolescence management recommendations by the international standard (Commission, 2007). the functionality of the tool will be enhanced to enable the assessor to record and monitor an "Opportunity for Improvement" against the current OM management process of the company. This work is a complement of a previous one that can enable not only self assessment but also competitiveness.

In the next section of this paper, the research methodology is described. Then the maturity model is presented. The last section is the conclusion where, the contribution of this work is summarized and forwarded by its limitations and further work.

4.2 Research Methodology

The main contribution of this paper is to present a validated maturity model in obsolescence management to support continuous improvement and sustainability. It was elaborated in two phases. The first phase was the development of the theoretical model. The second phase was the demonstration and the validation of the developed model via case studies (Yin, 2013) for demonstration and satisfaction surveys which were completed with semi structured interviews to validate, improve, and make the model more practical in an industrial context. Figure 4.1 explains the development and the validation process (adapted from (Peffer et al., 2007)):

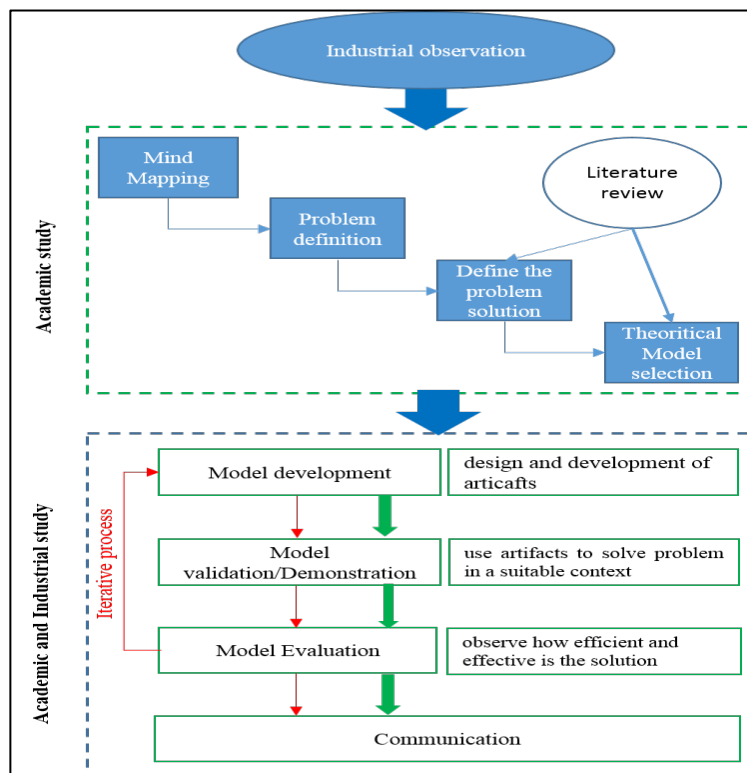


Figure 4.1 Design research methodology for maturity model development

4.3 Obsolescence management maturity model

we are studying obsolescence management since few years to respond to an industrial need in term of forecasting and management. The idea to develop a maturity model comes first from the identification of this industrial need and the gaps identified in the literature. Developing a maturity model in obsolescence management requires a deep understanding of the elements of the requested system and processes. At the beginning, the obsolescence risk was more obvious in SDS (Sustainment Dominated Systems) like military systems and avionics because of their long lifecycle compared to other technological products.

4.4 Formulating the maturity model

Based on the analogy between project management and obsolescence management, the CMMI model was adopted as a framework for this work. The CMMI-based maturity model for obsolescence management was developed according to the staged representation. This representation was chosen since it provides a pre-defined roadmap for organizational improvement. It allows also comparisons across and among organizations by giving a unique rating that recaps evaluation results. We defined sets of process areas to create an improvement path. This improvement path is described by maturity levels. Each ML is a well-defined evolutionary basis toward accomplishing an improved obsolescence management process. These maturity levels (Figure 4.2) are related to the maturity of the company in obsolescence management. They classify organizations according to their ability and capability to control and manage the obsolescence risk. They describe an evolutionary method for improving capabilities in the field from immature to disciplined and mature or optimized. the ML defined in this model covers the main three levels in obsolescence management (Bartels et al., 2012; Sandborn, 2007). The levels 1 and 2 are for organization that are reactive only in their obsolescence management. When it occurs, managers run to solve it with the minimum cost. At the third level, companies gain a new management side: the proactive management by forecasting the approximate obsolescence dates of vulnerable components and so obsolescence is no longer a surprise. Such a strategy can help companies to avoid many costs like delays and surprise impact but still without wide visibility in the future. Maturity levels 4 and 5 define a

strategic management for technological obsolescence. The process is measured, controlled and continuously improved. Tools are developed for technological watch and technological intelligence over the market. Those companies are invested in obsolescence management for medium and long terms. Useful processes and activities are set up to handle all the process under control.

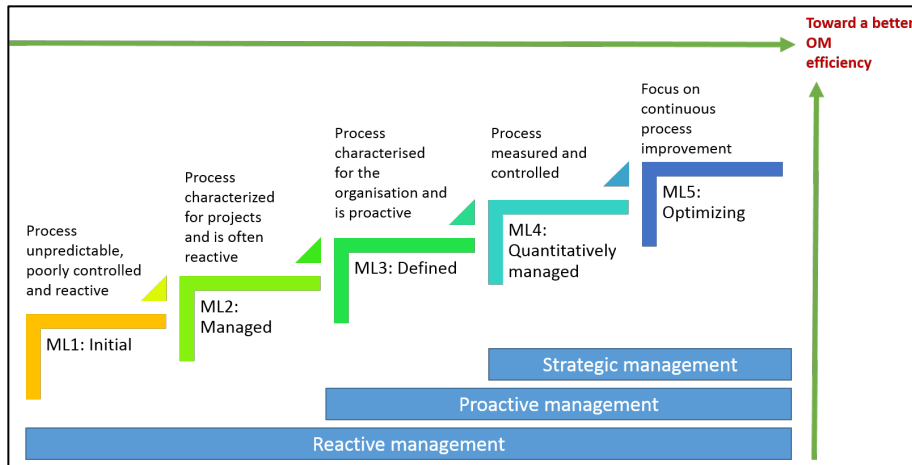


Figure 4.2. An overview for obsolescence management levels

The staged model provides sequences of improvement. Each sequence provides the basis for the next. To move to the next level, you should completely perform the previous one as described in the Figure 4.3.

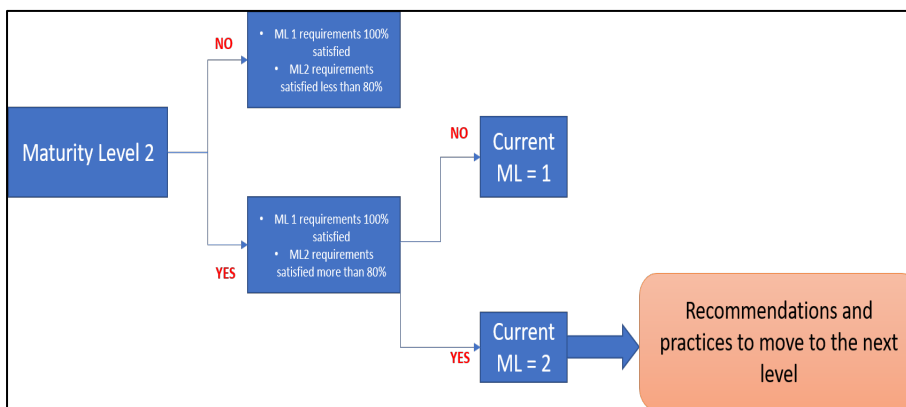


Figure 4.3. Decision tree of moving from a ML to another

Each level defines obsolescence management related process areas PA. For each PA, generic goals GG and specific goals SG are defined and can be achieved by completing the right tasks T. For example, at ML 2, we find PA1 defined as the management of electronic components and equipment. Its first GG is the establishment of a configuration reference. A SG at this level is the ranking of components and equipment's suppliers. For each goal, tasks and practices are defined like T2G11 (Task, level 2, generic, GG1, task1): assign an identifier for each element of the configuration. The number of PA, GG and SG per maturity level are given in the Tableau 4.1.

Tableau 4.1 The number of PA, GG, SG per maturity level

ML	PA	GG	SG
1	0	0	0
2	6	10	5
3	4	8	2
4	2	5	2
5	1	2	3

The evaluation of the maturity level cannot be subjective, the assessor has just to mention, for each task, if it was done or not. Then, he concludes about the current ML in obsolescence management of the organization and suggest practices to adopt to move to the next ML. An organization has $ML = i$, if it has already satisfied 100% of the level (i-1) requirements and at least 80% of the level i requirements.

To demonstrate the model developed, multiple case studies were carried out on different companies operating in technological industries. As an observation, two major groups of companies exist: companies who are 100% reactive (ML =1 or 2) and companies who are too concerned about the threat and are well invested in the mitigation and the resolution of obsolescence risks (ML= 4 or 5). We observed also that big companies in the avionic industry doesn't have any responsibility on obsolescence management and charges its suppliers the responsibility to mitigate and resolve any potential risk. This type of companies (like the UK MoD) need the maturity measurement tool in obsolescence management to evaluate their

suppliers and choose the most mature to ensure a certain confidence, stability and sustainability.

After demonstrating the tool, satisfaction surveys were asked for people who were assessed and did not participate in the elaboration of the tool. The process is still working in order to reach the required empirical saturation level then, workshops with obsolescence experts will be conducted to standardize the tool and commercialize it.

4.5 Conclusion and discussion

This research has developed a basic maturity model for obsolescence management which covers all process areas that can be impacted by the obsolescence or involved in its management, generic goals, specific goals and activities. The model was demonstrated and evaluated within multiple industries. The tool described in this paper was mainly developed to allow managers to better manage obsolescence risk. It presents a basis for a standard and general maturity model in obsolescence management for comparison among organizations but also for continuous improvement and sustainability. Such a tool will help firms to better choose their suppliers before or after moving from traditional contracts as it is applicable for suppliers as well as customers. In summary, the benefits to organizations of using a maturity measurement tool in obsolescence management are:

1. Measuring the current maturity level
2. Compare the maturity levels with competitors
3. Measure the maturity level of suppliers
4. Help suppliers and customers to improve their maturity level
5. Achieve generic and specific goals with respect to companies, IEC2007 and ISO9001 for continuous improvement

While the maturity model demonstrated in this paper covers almost all obsolescence management sides, it is still a first attempt to reach the quality required for commercial use. Many improvements are required. It starts with the enlargement of the circle of application to

fit all types of firms. Then, the validation process is restricted and needs international obsolescence experts for tool evaluation and improvement. The continuous representation approach can be also tackled to complete the staged representation and allow managers to measure firms' capabilities in obsolescence management for all technological industries and not only military use like TOMCAT.

CHAPITRE 5

A TWO PHASE PART FAMILY FORMATION MODEL TO OPTIMIZE RESOURCE PLANNING: A CASE STUDY IN THE ELECTRONICS INDUSTRY

Imen Zaabar ^{a*}, Yvan Beauregard^a, Vladimir Polotski^a, Marc Paquet^b, Léon Bérard^c and Boujemaa El-ouaqaf^c

^a École de Technologie Supérieure, mechanical engineering department, 1100 Rue Notre Dame O, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

^b École de Technologie Supérieure, systems engineering department, 1100 Rue Notre Dame O, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

^c IBM Bromont, Industrial Engineering Department, 23 Bd de l'Aéroport, Bromont, QC J2L 1A3, Canada

Article published in “International Journal of Operational Research” journal, January 2022

Résumé

Le regroupement est une méthodologie puissante utilisée dans de nombreux secteurs industriels pour regrouper des objets en familles. Il est donc difficile d'imaginer une méthode naturelle de regroupement d'objets sans tenir compte du contexte d'une application particulière. Dans les problèmes de grande dimension, caractérisés par un volume important et un flux de pièces en évolution rapide, de nombreuses méthodes de regroupement ont été utilisées pour former des familles de pièces en se basant sur leurs similarités. Cet article présente une méthode de regroupement en deux phases, développée pour optimiser la formation de familles de pièces sous contraintes technologiques. Elle vise à améliorer la planification des ressources. La première phase consiste à former des familles de pièces à l'aide de l'approche AHC Agglomerative Hierarchical Clustering, en considérant une paramétrisation multidimensionnelle issue de la fabrication des cartes électroniques. La seconde phase consiste à déterminer le nombre optimal de groupes, réduisant ainsi la complexité de la planification et la charge de calcul. Les contraintes technologiques de production étant souvent incertaines et

sujettes à évolution, la procédure proposée doit rester flexible. La détermination du nombre optimal de familles de pièces est donc considérée comme un problème multicritère (MCDM). Les écarts entre la production réelle et la production théorique du regroupement représentent les critères alimentant le modèle multicritère. L'algorithme ELECTRE III est utilisé pour déterminer le nombre de familles le plus approprié en tenant compte de l'incertitude. À partir d'une étude de cas réelle dans l'industrie électronique, une solution améliorée de planification de la production est proposée afin de valider l'efficacité de la méthode. Les performances de cette solution ont été comparées au regroupement par familles de composants actuellement utilisé pour mettre en évidence la valeur ajoutée du nouveau modèle. Les résultats du modèle MCDM amélioré ont également été comparés aux indices de performance du regroupement conventionnel afin de démontrer ses avantages.

Abstract

Clustering is a powerful methodology used for grouping objects into families in numerous industrial areas. It is therefore hard to conceive a natural way of object grouping without considering the context of a particular application. In high dimensional problems with large volume and rapidly evolving flow of parts, many clustering methods were previously used to form part families considering similarities. In this paper, a two-phases clustering method is developed to optimize part family formation under technological constraints. It aims to improve resource planning. The first phase consists in forming part families using the AHC approach considering multidimensional parametrization of the part processing types. The second phase consists in determining the optimal number of clusters that reduces the planning complexity and computational burden. As the production technological constraints are often uncertain and subject to changes, it is required to keep the proposed procedure flexible. Thus, determining the optimal number of part families is seen as a multicriteria problem (MCDM). The offset between the real production and its clustering-based represent the criteria that fed into the multi-criteria model. ELECTRE III package is used to rank the most suitable number of clusters under uncertainty. Based on a real case study in the electronic industry, an improved production planning solution is proposed to validate the method's efficiency. The solution

performance was compared to the part family grouping currently in use to highlight the new model added value. The improved MCDM model results were also compared to conventional clustering performance indexes to demonstrate its advantages.

Keywords: part family formation; composite part; clustering; multicriteria decision making; ELECTRE III

5.1 Introduction

The electronic industry is one of the sectors where competition is very high (Borenich, Dickbauer, Reimann, & Souza, 2020). Dealing with the sector interrelated problems such as products variety, volatile market, product life cycle management, demand satisfaction, environmental impact, service and warranty management and quality control, is a real challenge and requires an efficient, robust and flexible management model. In this context, to handle the variety of products and to optimize production and resource planning, cellular manufacturing was introduced to create and to operate manufacturing cells. It allows the application of group technology theory (Aalaei & Davoudpour, 2017) where part families are formed based on their similarities in required operations, machines and technologies. To remain competitive, cellular manufacturing is still a powerful model but it does not support frequent changes and reconfigurations (Baykasoglu & Gorkemli, 2017). Many specific cases were studied in the literature to get around this gap (Khorasgani & Ghaffari, 2018). As the electronics market often consists of volume-driven, complex and variable products, a large volume of data is generated and dealing with it becomes a real problem. To this extent, when the reconfiguration cost is high and data volume is large, reducing the cellular manufacturing to the part family formation problem while maintaining machines configuration fixed is a common practice within electronics firms (Gauss, Lacerda, & Cauchick Miguel, 2020; Pillai & Subbarao, 2008).

In our modern connected manufacturing environment, intelligent solutions are needed to cope with real world problems while providing the flexibility of information systems and efficiency

of cost reduction (Büchi, Cugno, & Castagnoli, 2020). Part family formation problems were largely studied in different contexts, particularly, in cellular manufacturing (Ashraf & Hasan, 2015; Chandra Sekhar & Laxminarayana, 2017; Hachicha, Masmoudi, & Haddar, 2008; F. Hasan & Jain, 2016; Kamalakannan & Pandian, 2018; Mehmood, Noor, Upadhyay, Hasan, & Ashraf, 2015; Roy & Komma, 2014; Wang, Huang, Shang, Yan, & Du, 2016). Mainly traditional technics such as similarity coefficients or matrices are often used while ignoring the challenging increase in data volume within sophisticated manufacturing systems. Recently, machine learning algorithm, known for handling big data, were introduced to solve it using Neural Networks (Baykasoglua & Gorkemli, 2015; Hasan & Jain, 2016). With all the variety of applications of clustering methods for manufacturing systems, most of them are often targeting optimization of the production process. The possible applications of clustering methodology to planning problems, in particular those arising in electronics industry were not, to the best of the authors' knowledge, addressed in the scientific literature.

In this paper, we introduce the usage of intelligent algorithms for the part family formation problem at the resource planning level. Partitioning a large variety of part types into part families is required to provide the best possible approximation for the planning parameters (time, workforce, incurred cost). This approximation is used at several management levels instead of the part-by-part calculations that seems more precise but is actually impossible to perform in the real industrial context because of unbearable computation burden. In the particular context of the electronics testing facility, considered in our case study, the planning procedure currently in place, is not capable of handling the large volume of data, so an approach based on *operational sheets* is adopted. Namely, a data-unit called an operational sheet is created for multiple parts (each characterized by a part number -- PN) sharing operations with similar (but not identical) settings.

This approach is somehow similar to those developed within "group technology" (Ham, Hitomi, & Yoshida, 1985) and "composite part" (Roy & Komma, 2014) frameworks used in cellular manufacturing. Parts sharing the same operational sheet are considered as having the same operation parameters, which serve as an input to the planning procedures. The objective

of defining the parts families is to get the best possible approximation for planning procedures based on aggregated parameters (as compared to hypothetical PN-based planning). Traditional part family formation models developed for cell manufacturing problems most often target maximisation of the grouping efficacy (Saraç & Ozcelik, 2012) or the minimization of inter-cell movements of the parts (Ilić, 2014). Although these models are effective for production optimization, they cannot be directly used for the specific case targeting resource planning problematics considered in this paper. We propose to use the hierarchical clustering technique to form part families with particularly scaled distance-based inter-part similarity exploiting the intermediate production-type objective function used by industrial experts within planning algorithms.

The developed algorithm allows to minimize the average error between the part-based planning and the family-based planning. It, also, enables the family formation while monitoring the key performance indexes needed to evaluate the efficiency of obtained grouping in a highly dynamic manufacturing environment with a fast-changing demand and technologies. Unlike part family formation problems addressed in the literature, the specific part family formation in this paper is not targeting minimization of part inter-cell movements or cell structure optimization, but it is used to provide the best possible approximation for aggregate family-based planning.

The rest of the paper is organised as follows: Literature review is given in section 5.2 The proposed methodology is described in section 5.3, followed by the details about the underlying procedures. The case study and related implementation issues are described in section 5.4. Conclusions and future work are presented in section 5.5.

5.2 Literature review

The part family formation problem was mainly studied in the context of GT (Group Technology) applications. The most advanced usage is noticed in flexible manufacturing systems and particularly in cellular manufacturing and reconfigurable manufacturing systems.

Cellular manufacturing in group technology is about managing the production of part families with similar characteristics on different machines to optimize systems performances and productivity. Many mathematical and graphical models were used to solve the reconfiguration problems such as linear programming, multicriteria decision making, graph theory, machine learning and artificial intelligence algorithms. Many papers studied the part family formation in the Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS) context, mainly to manage production and to minimise change cost. In (Prasad & Jayswal, 2019), authors used ALC (Average Linkage Clustering) algorithm for part family formation considering three criteria: reconfiguration effort, under-utilization cost and floor space cost. AHP (Analysis Hierarchy Process) has been applied to calculate criteria weights where reference ideal point method served to select alternatives. In (Yan, Wang, & Fan, 2014), authors proposed a two-phase clustering algorithm for machine-cell and part-machine family formation in the design of cellular manufacturing systems in group technology. The resolution is based on an initial solution where cluster centers are determined by a linear assignment method using the least similar group. A fuzzy c-means clustering method made the part families. Dissimilarities were calculated using the Minkowski metric. Same fuzzy c-means clustering methods were used by (Susanto, Bhattacharya, & Al-Dabass, 2010) in the design of a cellular manufacturing system.

The similarity matrix or coefficient is as important as the clustering method in part family formation problems. Depending on the regrouping context, the distance between different elements to cluster has to be calculated to represent similarity degree between different elements to regroup. This similarity coefficient was covered in many papers to allow a better similarity measurement resulting in a more understandable and adequate clustering (Hasan, Baqai, Butt, & Zaman, 2018; Kusiak & Cho, 1992; Wu & Suzuki, 2015). For example, (Goyal, Jain, & Jain, 2013) developed a new operation sequence based BMIM similarity coefficient. The new similarity coefficients were then compared with the existing ones identified in the literature. An average linkage hierarchical clustering algorithm were later used to form part-families. Eigenvalues and eigenvectors on the correlation similarity matrix are found using Principal Component Analysis (PCA) (Gupta, Jain, & Kumar, 2013; Ashutosh Gupta, Jain, & Kumar, 2014). A new similarity formulation was developed by (Alhourani, 2013). It

incorporates multiple process routings in addition to operations sequence, production volumes, duplicate machines, and machines capacity.

Uncertainties need to be considered to get loyal representations of the reality. That's why fuzzy logic approaches were used in several studies. For example, (Hung, Yang, & Lee, 2011), applied a fuzzy relational data clustering algorithm to form part families in the cellular manufacturing system design problem. The model was validated based on the grouping efficiency from the literature. In a joint context of Group Technology and uncertainty, a fuzzy c-means based hybrid evolutionary approach, was developed by (Yin, Khoo, & Chong, 2013) to the clustering of supply chains.

Another way to form part families is heuristics and metaheuristics (Gauss et al., 2020). Ghosh, Modak, & Dan, 2011 solved the part family formation using a new version of simulated annealing algorithm SAPFOCS exploiting Part Coding Analysis (PCA). The proposed method was compared to the classic clustering algorithm: The C-Linkage clustering technique. Megala & Rajendran, 2013 proposed and improved ant-colony optimisation algorithm to solve the part-family formation and cell-machine in the cellular manufacturing system to maximize the grouping efficacy. Their results were validated in a benchmark. Ghosh & Dan, 2012 assumed that part family formation is an NP class problem, but the literature doesn't cover the parts clustering in the designing step. To solve this problem, the authors exploited parts coding and used a minimal PSO (Particle Swarm Optimisation) algorithm to obtain effective part families.

While most studies solved the part family formation using metaheuristics or modified clustering algorithms (Gauss et al., 2020), Nunkaew & Phruksaphanrat, 2014 used a lexicographic fuzzy multi-objective model to solve the part-family problem and Kumar & Jain, 2008 used an orthographic view part grouping analysis for part family formation to solve part-machine group formation problem with operation sequence, time and production volume. These methods gave interesting results when adapted in their specific context.

As manufacturing parameters are changing over time, updating clustering is crucial. Padayachee & Bright, 2016 and Baykasoglu & Gorkemli, 2015, 2017 went dynamic. Baykasoglu & Gorkemli, 2017 proposed an agent-based model for virtual cellular manufacturing under dynamic demand arrival. The method is based on an initial part family disposition that will be modified to integrate the new arriving parts. The new part family formation is based on an average dissimilarity index. Padayachee & Bright, 2016 used fuzzy C-means clustering and Jaccard distance to model part family problem. The model was solved using genetic algorithm. For multi-period cell formation, an integer programming model was developed to find the optimal trade-off between reconfiguration cost and deficit capacity cost.

For more advanced studies, Sekhar & Laxminarayana, 2017 suggested an Artificial Intelligence (AI) vision system to identify parts or components based on their part families. The data given by the proposed AI were used to perform the clustering algorithm to provide families classification. Hasan & Jain, 2016 used the classic AI neural network to assess dynamic part family formation in a reconfigurable manufacturing system (Chandrasekharan & Rajagopalan, 1986). A BP (Back Propagation) neural network to assess dynamic part-family formation was suggested by (Liu, Li, & Wang, 2014). While the main clustering was performed using k-means method, its efficiency was validated based on several clustering validity indexes, namely CH-index, DB-indexes, KL-index and Sil-index.

This overview shows that existing approaches to solve part family formation problem are most often used to address production optimization using cellular manufacturing framework. They provide good solution under changing and volatile demand but none of these approaches, to the best of the authors' knowledge, was adapted to the situation with (A) (fixed machines configuration) and (B) (family formation) required for aggregating a very large variety of parts into manageable quantity of families, subsequently used for resource planning. Most of the studies focused on both machine-cell and part-machine family formation in the design of cellular manufacturing systems, while part family formation proves useful for solving other managerial decision. In the industrial environments similar to those of our partner company, grouping similar parts into families is necessary to avoid part-by-part resource planning that

proves unbearable when dealing with a large number of products. Optimization goal of grouping parts into families is to reduce the error between planning based on operational sheets (of each group) ideal (unrealistic due to organizational and computational burden) part-by-part planning.

Our proposed complete clustering approach was developed as an extension of the work performed in response to increased industrial needs within particular context of the partnering company. All regrouping parameters are considered. First, after data cleaning, criteria weights were determined based on the average sensitivity of each attribute considering particular throughput function suggested by industrial expert. This allowed avoiding the unfounded choice of weights and resulted in defining the satisfactory similarity matrix complying with performance characterization in use. Then, a clustering algorithm was applied to construct part families. Finally, as a single criterion can rarely meet inherently multi-facet industrial requirements, to optimize the decision, a multicriteria decision making was used to handle uncertainty and to optimize the number of families.

5.3 Problem description and proposed methodology

5.3.1 Problem statement

In the digital era, with an increasing number of products varieties, especially electronic ones, production management is becoming more and more costly in terms of data management, time and other resources consumption. Due to the permanent change in production parameters, cellular manufacturing based on forming part families with similar attributes has been a good alternative to lighten the production management process and to adapt it for the new product sequencing road map. In this context, family formation is not an option but an obligation to keep competitiveness by minimizing total cost. Operations management is becoming more and more automated, connected and data based. Thus, automating part family formation to deal with huge data becomes an integrated part of the next industrial revolution 4.0.

To reduce the quantity of data used within the production and planning tools, companies often use operational work sheets. An operational sheet contains a complete description of one operation parameters that a product (a part) is supposed to go through. It is not created for each individual component, but for a group of components sharing one operation with similar parameters. This cluster (or group) of components is called a parts family (as each component is initially determined by a part number) where parts similarity is clearly defined and calculated. The operational parameters are calculated in function of its forming parts. This approach also constitutes a security layer to protect the production planning mechanism from aberrant data, highly expected in the raw data from both internal and external data bases (Figure 5.1). Data is, first, filtered according to internal specific criteria and exported to a secondary data base where part families are formed, and operational sheets created. Families' attributes are then monitored to not exceed a certain allowable increase and decrease defined by the user. A cleaning step is also mandatory when extracting data from internal database. Production and planning optimizers are then safely executed. The main contribution of this work is to ensure that families are well formed while minimizing error between the part-based planning and family-based planning.

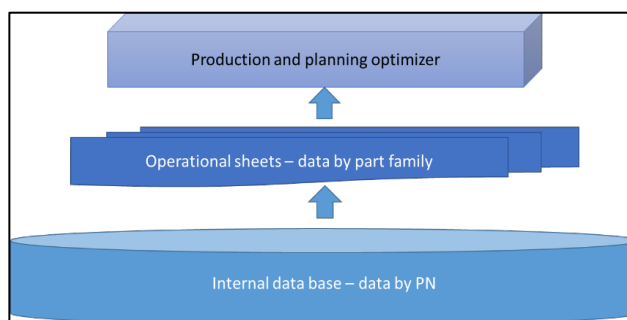


Figure 5.1 Data flow description from the internal data base to the production and planning optimizer

Considering having n parts, each has its own operations sequencing. Parts sharing similar operations setting will be processed together with average settings. The whole production planning becomes a map with routes as described in Figure 5.2 . The usage of operational

sheets is frequent within electronic industry with the increase of product variety. It is a way to handle the volatility and manage the production.

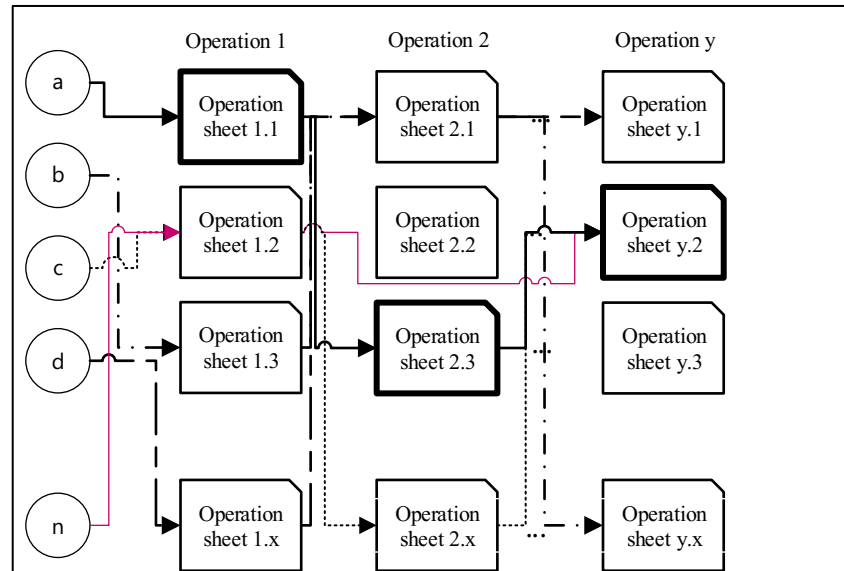


Figure 5.2 Production planning map using families operational work sheets

The part *a*, in Figure 5.2 goes through operations 1, 2 and *y* using consecutively operation sheets *1.1*, *2.3* and *y.2*. While it is the only part among parts *a*, *b*, *c*, *d* and *n* on sheets *1.1* and *2.3*, it shares the *y.2* with parts *n* and *c*. Then *a*, *c* and *n* are forming a family for operation *y*. A shared operational work sheet is then created for parts *a*, *c* and *n* for the operation *y*. Sheet production parameters will be then calculated based on each part's production parameters. The sheet serves as input to the production and planning optimizer. Thus, operation *y* parameters for parts *a*, *c* and *n* are calculated for the whole group. Families' formation is, then, a critical step in the planning. Any inaccuracy in grouping process will result in an inaccuracy in the planning which deeply impacts the finance and production departments.

The contribution of this work is to identify the optimal part families' composition and the optimal number of operational sheets while minimizing the data quantity (number of families) with respect to the technical constraints. The latter are allowable decrease and increase on parts attribute values around the value of attribute of the family to which a part is affiliated.

Depending on the range of that attribute, allowable decrease and increase might widely vary. It is not possible to determine the exact range, that's why errors and intervals of variations are calculated for all alternatives (alternatives are all possible values of number of families from 1 to n : the total parts to cluster). The decision maker will then choose the optimal number of families according to their limits and preferences.

To execute the scheduling and production optimizing tool, one operational sheet per operation is needed for each part. The data taken from the operational sheet to plan and schedule production is then applied for the entire family. To get the optimal part families, a mathematical model is developed. The problem parameters and variables are described below.

I - set of parts, $i: 1..n$

J - set of attributes, $j: 1..m$

L - set of possible clustering partitions or *alternatives*, $l: 1, \dots, n$

K - set of families in clustering partition $l \in L$, $k: 1, \dots, l$ (it depends on l , but we skip the index l to simplify the notation)

P is one or more *performance* indicators that are chosen by the user. It could depend on the parts, the families or the alternatives.

The model objective is to minimize the offset error between part-based planning performance and family-based planning performance over all possible partitions. To deal with that, the potential performance PP_i of a part i needs to be computed based on individual part's attributes A_{ij} . When a family k is formed within a clustering partition l , the family-based value of attribute j of family k within the clustering l : FA_{jkl} is calculated considering the chosen mathematical operator, (typically average, minimum or maximum) over all parts within family k .

Based on these primary parameters the following characteristics can be introduced:

FPP_{ikl} : Family-based Performance of Part i when in family k of clustering partition l

$$FPP_{ikl} = f\{FA_{jkl} | i \in I \text{ and is part of family } k \text{ in clustering } l\}, \quad (5.1)$$

$FPARE_{ijkkl}$: Family-based relative error of attribute j for part i in family k in clustering l .

$$FARE_{ijkkl} = \frac{|A_{ij} - FA_{jkl}|}{FA_{jkl}} \quad (5.2)$$

$PPRE_{ikl}$: family-based Performance relative error of part i in family k in the clustering l .

$$PPRE_{ikl} = \frac{|PP_i - FPP_{ikl}|}{FPP_{ikl}} \quad (5.3)$$

$FMRE_{jkl}$: Maximal relative error in attribute j over all parts in family k of clustering l .

Next, we introduce the characteristics of the families and clustering partitions. They are computed by maximizing the corresponding characteristic over all parts within the family and/or over all families within the clustering partition respectively:

$$FMRE_{jkl} = \max_i \{FARE_{ijkkl}, \forall j \in J, \text{ over all parts } i \text{ within family } k \text{ in clustering } l\} \quad (5.4)$$

$CARE_{jl}$: Maximal value of the relative error in Attribute j over all families clustering l .

$$CARE_{jl} = \max_k \{FMRE_{jkl}, \forall j \in J, \forall k \in K \text{ and } k \text{ is a family in clustering } l\} \quad (5.5)$$

$FPRE_{kl}$: Maximal performance error within family k of clustering l .

$$FPRE_{kl} = \max_i \{PPRE_{ikl}, i \in I \text{ and part of family } k \text{ in clustering } l\} \quad (5.6)$$

$CPRE_l$: is the value of the performance error in clustering l .

$$CPRE_l = \max_k \{FPRE_{kl}, \text{ over all families } k \in K \text{ and } k \text{ is a family in clustering } l\} \quad (5.7)$$

Relative errors are calculated to evaluate the performance of all possible clustering partitions (alternatives) since neither partition, nor even the optimal number of families, is known in advance. The performance table, used for comparing different clustering partitions contains

the criteria: the index of clustering partition l , the maximum error for the performance P : $CPRE_l$, and the maximum error for each (additional) criteria J . It represents the input to make decision about the optimal number of clusters. The model considers technical constraints to ensure a robust part family formation procedure, that can support very large number of parts. The robustness of the solution is provided by considering the maximum error from all families for each alternative. Choosing to calculate the maximum error is a conservative approach to minimize the model exposure to any criteria compensation in the decision process if the mean or the median were chosen.

The final output of the proposed methodology is the ranking of all alternatives considering the criteria described earlier. The obtained solution contributes in the optimization of the data quantity (number of families) with respect to technical constraints.

5.3.2 Methodology details

It is well known that there are no “one-fits all” solutions, when clustering is concerned. Thus, a particular part family formation method is proposed in this paper to optimize resource usage. A two phases method is described where a classic clustering method is used. As technological constraints related to the allowable variation of the cluster attributes are uncertain, a study on their variability range was performed and validated by the decision maker. To handle uncertainty and help the decision maker adopt the most suitable solution for a specific application, a multicriteria decision analysis was used to spread out all “reasonable” solutions and classify them with regards to the objective functions. The multiplicity of objectives like minimizing the variability in each part family for each criterion and optimizing the performance P made the part family formation a multicriteria decision making problem. Such situation in the part family formation problem was studied in the literature where multi-objective modeling was used in the resolution (Nunkaew & Phruksaphanrat, 2014).

In the particular case of this paper, a part family formation is considered with fixed machines. Operations do not change to reconfigure the manufacturing system. It is a specific case

concentrated on similarity in a single operation parameter to optimize resource planning. The proposed methodology is adapted from a conventional part family formation problem resolution as described in the methodology chart flow (Figure 5.3).

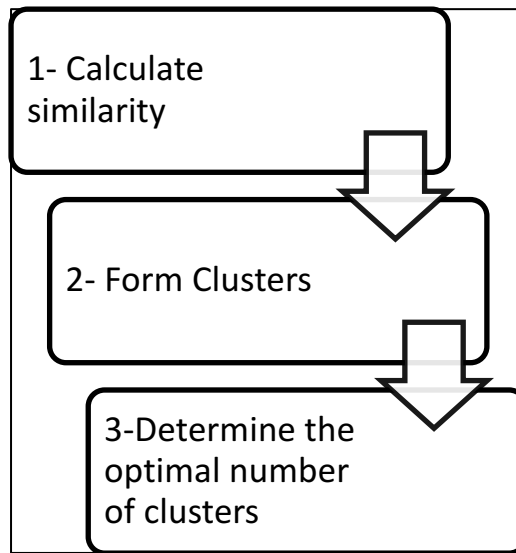


Figure 5.3 The paper methodology flow chart

5.3.2.1 Calculate similarity

“The performance of machine learning algorithms depends heavily on the representation of the data they are given” (Goodfellow, Bengio, & Courville, 2016). For that reason, a preliminary data processing was performed to prepare it to the part family formation using a clustering algorithm. Based on the performance function, weights were calculated using Budka, 2013 methodology where the clustering is viewed as an optimization problem. Based on an objective function, the choice of an appropriate similarity measure or the choice of the clustering algorithm itself is made. It helps to assess the quality of the obtained clustering result. The objective function of this study was, then, carefully built to represent the desired properties and to capture relevant factors.

Defining the similarity measure is the first step in this direction. Most often, this step is trivialized under assumption that some kind of distance exists in the attribute space. The

discussion is, then, limited by choosing the distance type (e.g. Euclidian, Mahalanobis, Hamming, etc.). In some cases, however, the set of variables (attributes) used for the problem description is so heterogeneous that even defining the relative scale becomes a nontrivial task. For the practical problem considered in the case study section, the variables are: *test time* ($A_1 = TT$), *retest rate* ($A_2 = RR$) and *lot size* ($A_3 = LS$). The naturally arising question is, “what are the appropriate measurement units for each of the attributes?”. In practice, A_1 is measured in time units (e.g. seconds), A_2 is a fraction, and A_3 is a whole number. Let us consider an example with a representative point described by the following attribute values $A_1 = 5$ sec, $A_2 = 0.03$ and $A_3 = 400$ (meaning testing time of 5 seconds with retesting of 3% of parts and the total of 400 parts within the lot. Using directly these values results in making the classification decision almost solely on the A_3 -values practically neglecting A_1 and A_2 -values. The question arises: should not A_3 be measured in 100-s of units and A_2 in percent, for getting the “normalized” values of the same order ($A_2 \sim 3$, $A_3 \sim 4$)? It can be reformulated as follows: how to appropriately scale the heterogeneous attributes in order to construct the meaningful classification algorithm. Only after this question is resolved, the similarity can be appropriately defined through the pairwise scaled distance function in the attribute space.

Scaling is most often considered in scientific literature as a technical issue. One of the approaches often suggested for scaling heterogeneous data is the use of relative importance weights for different attributes with subsequent data normalization. However, as pointed out in (Davies & Bouldin, 1979), "Cluster analysis is often one of the first steps in the analysis of data", and it is performed "in the context of very little a priori knowledge". The commonly known drawback of many clustering algorithms is that "their performance is highly dependent on the user setting various parameters" (Chen, 1976).

When the scaling issue is addressed without referencing to a priori knowledge, it is often suggested to ensure that the relative variability of the attributes is equalized (Everitt, Landau, Leese, & Stahl, 2011). Namely, the scales s_j for attribute j is chosen to ensure that $v_j = STD_i(PA_{ij})/E_i(PA_{ij})$ are the same for all attributes j . Here $STD_i(.)$ and $E_i(.)$ stand respectively for the standard deviations and mean values computed over all points i . This is

inline with a more general approach proposed in (Mojahed, Bettencourt-Silva, Wang, & de la Iglesia, 2015) for dealing with heterogeneous data by implementing fusion methodology. These approaches have an important drawback of not considering how different attributes actually affect the system performance characterized by an appropriate function (since equalizing variability is close to the silent assumption that the effects are equal for all attributes).

In many practical situations, the overall system behavior is characterized by a (scalar) function of the attributes $A_j, j = 1, \dots, m$. This function is often a part of *a priori* knowledge that reflects the practitioner's expertise. For the case study discussed in detail in section (3.4), the main performance characteristic is the *overall throughput*: $\sum_i(PP_i)$, which is expressed as an explicit function of 3 attributes ($m = 3$): $A_1 = TT, A_2 = RR, A_3 = LS$. The detailed formulas are presented in Appendix B. Consequently, we propose to start from such performance function for determining the attribute's weights (relative scales) as an alternative to the commonly founded assumption that such weights are known a priori.

We, therefore, propose below an approach based on the use of information contained within the *performance function* in order to compute meaningful relative scaling coefficients, and to use them to define relative weights for the attributes.

Let us suppose that a scalar function characterizing the system behavior is given and can be expressed as a function of the main (first) attribute ($j=1$) and other ($m-1$) attributes in the following form:

$$P(A_1, A_2, \dots, A_m) = \sum_{i=1}^n \varphi_0(\varphi_1(A_{i1}), (A_{i1} + \varphi_2(A_{i1}, A_{i2})), \dots, (A_{i1} + \varphi_m(A_{i1}, A_{im}))) \quad (5.8)$$

This form is a generalization of the type of function $P(\cdot)$ expressing the performance to be optimized. It's shown below how it can be used to define the scaling coefficient for attributes A_2, \dots, A_m . Since only relative scales are meaningful, the first attribute A_1 is kept unscaled. To compute the scaling coefficients for A_2, \dots, A_m based on formula (1), we use the structure of

the function $P(\cdot)$ in a following way. Since the arguments of $\varphi_0(\cdot)$ are of the additive form $(A_{i1} + \varphi_j(A_{i1}, A_{ij}))$, it is reasonable to expect that the quantities $\varphi_j(A_{i1}, A_{ij})$ for $j=2\dots m$ are comparable to A_{i1} . We will make a weaker assumption that this comparability holds on average:

$$E_i(A_{i1}) \sim E_i(\varphi_j(A_{i1}, A_{ij})) \quad (5.9)$$

To apply (2) for scaling, we follow the line of reasoning similar to stochastic linearization, seeking for weights w_j such that $E_i(\varphi_j(A_{i1}, A_{ij})) = w_j E_i(A_{ij})$. We therefore get:

$$w_j = (E_i(\varphi_j(A_{i1}, A_{ij}))) / E_i(A_{ij}), \quad \text{for } j = 2, \dots, m \quad (5.10)$$

Obtained weights can be used to determine the distance between two points Q_1 and Q_2 , described by the set of attributes A_{1j} and A_{2j} . The distance can be defined as follows:

$$D_{12} = (A_{11} - A_{21})^2 + \sum_{j=2}^m w_j^2 (A_{1j} - A_{2j})^2 \quad (5.11)$$

The rationale behind the proposed scaling (choice of weights) is that it results in the attributes providing the same (average) contribution to the distance as in the meaningful characteristic $P(\cdot)$. Note that scaling equation (5.9) can be also used when non-Euclidian distance is used instead of equation (5.8).

5.3.2.2 Form clusters – Agglomerative Hierarchical Clustering

Agglomerative hierarchical clustering is chosen to form part families as it allows exploring the results at different levels of granularity for relatively small data. Unlike the k-means technique, AHC is an unsupervised learning technique based on a bottom-up regrouping approach. It starts with the fusion of n items into cluster. If there are n objects to cluster, the following steps are executed:

Start with n clusters. Each cluster is a single object. $n * n$ distance matrix is defined with elements d_{ij} representing the distance between object i and object j

- Look for the nearest pair (U, V) based on minimum distance

- Merge clusters (U, V) into one new cluster T and update the distance matrix elements by:
- Deleting the rows and columns corresponding to clusters U and V
- Adding a row and column giving the distances between the new cluster T and the remaining of clusters
- Repeat steps 2 and 3, n times considering one linkage algorithm to merge clusters other than singletons.

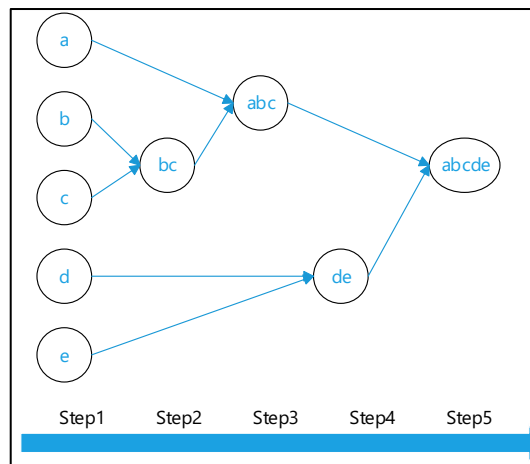


Figure 5.4 Clusters tree obtained by Agglomerative Hierarchical Clustering algorithm

While in HC (Hierarchical Clustering), the user can explore the results at different levels of granularity for relatively small data, standard clustering algorithms require the user to identify the optimal number of clusters in advance. This limitation could lead to an error (Chandra Sekhar & Laxminarayana, 2017; Padayachee & Bright, 2016; Prasad & Jayswal, 2019). Some approaches tried to provide guidance but they usually lead to specific heuristics to use in particular cases where optimality is not guaranteed (Budka, 2013). Within AHC learning algorithms, a number of different linkage methods have been explored such as Ward's method, complete linkage or single linkage. While Ward's minimum variance method looks for compact and spherical clusters by minimizing the intra-cluster variance, the complete linkage method helps to find comparable clusters. Some other methods could be found in the literature which are either a combination of the main linkage or a modified one (Legendre & Birks,

2012). Complete linkage is selected, in this study, to form similar cluster and to improve solution robustness by always considering the maximum error or distance. Complete linkage formulation requires the following definition of the distance D between clusters c_1, c_2 :

$$D(c_1, c_2) = \max_{x_1 \in c_1, x_2 \in c_2} D(x_1, x_2) \quad (5.12)$$

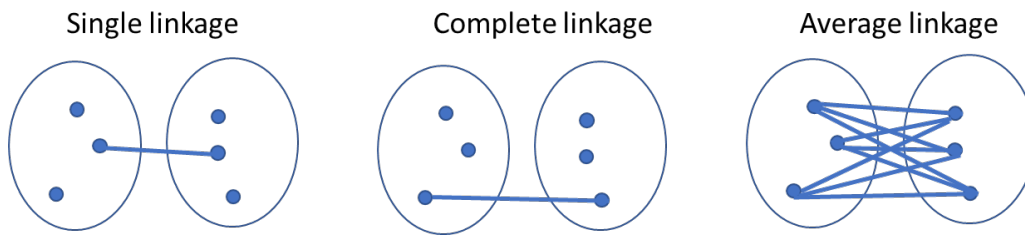


Figure 5.5 Main linkage algorithms

The central issue in solving the clustering problem is to measure the effectiveness of the result. Thus, it could be considered as an optimization problem where the goal is to find not only the best input pattern but to find the optimal number of clusters. Thus, building the appropriate objective function to represent the usage utility and the user presumptions is the most critical step (Budka, 2013).

5.3.2.3 Determine the optimal number of clusters using multicriteria decision making tool

The Hierarchical Agglomerative Clustering cannot determine itself the best number of families that could improve and optimize the family formation process by minimizing all the calculated errors: $CPRE_l$ and $CARE_{jl}$. As the desired solution requires the minimum number of families to lighten in flow data, and the minimum error on all attributes, it is difficult to a human being to take a decision or rank alternatives with multiple criteria in mind. For that reason, we relied upon outranking multicriteria decision making process. In this context, ELECTRE III was selected among many other possible techniques for multiple reasons (Figueira, Mousseau, & Roy, 2005). First, the situation requires the use of non-compensatory aggregation procedures as the dropping on a given criterion cannot be compensated by the gain on another one. Second,

the aggregation procedures usage is limited to decision problems with more than five criteria and less than twelve which can be a limitation on the use of our model. Finally, the strong heterogeneity with the nature of evaluation among criteria makes the aggregation in a unique and common scale very difficult in addition to the fuzzy decision environment and uncertainty of criteria range per family of parts. Under all of these constraints, ELECTRE III is selected as the most adequate MCDM method that can support the part family formation problem. Let's define the ELECTRE III inputs:

- A : set of alternatives where a and b are different alternatives
- F : set of criteria or objective functions and g criterion,
- J : set of indices of the criteria,

ELECTRE III is used to rank alternatives. In this case, the alternatives are the number of clusters to consider in the part family formation. The multiple criteria decision making method helps by expressing the user preferences when a set of solutions must be ranked according to a set of criteria often contradictory (Figueira et al., 2005). Outranking relations S are used to model preferences. S means “at least as good as”. Considering the two alternatives a and b :

aSb and not bSa , i.e., aPb (a is strictly preferred to b)

bSa and not aSb , i.e., bPa (b is strictly preferred to a)

aSb and bSa , i.e., aIb (a is indifferent to b)

Not aSb and not bSa , i.e., aRb (a is incomparable to b) alternatives

The decision maker contributes to the ranking process by defining the three preferences parameters: the indifference thresholds q , preference thresholds p and veto thresholds v . Each objective or criterion has their own thresholds that will be used later to rank the alternatives when it comes to calculate concordance and discordance indexes. In addition, the method gives the user the opportunity to calculate a relative weight to each criterion depending on its relative importance in the operative context.

The outranking in ELECTRE III is based on concordance and discordance principle. Alternatives are compared to each other and concordance index and discordance index are generated. While the concordance $c(aSb)$ (5.13) is considered when one alternative is as good as another, discordance $d_j(aSb)$ (5.14) calculates the possible rejection of one solution compared to another, basically when criteria are compared with consideration to thresholds:

$$c(aSb) = \sum_{j \in J^s} w_j + \sum_{j \in J^q} \varphi_j w_j \geq s \quad (5.13)$$

$$d_j(aSb) = \begin{cases} 1 & \text{if } g_j(b) > g_j(a) + v_j(g_j(a)) \\ 1 & \text{if } g_j(b) \leq g_j(a) + p_j(g_j(a)) \\ \frac{g_j(b) - g_j(a) - p_j(g_j(b))}{v_j(g_j(a)) - p_j(g_j(a))} & , \text{ other wise} \end{cases} \quad (5.14)$$

Where, the coefficient φ_j decreases linearly from 1 to 0, when g_j describes the range:

$$\left[g_j(a) + q_j(g_j(a)), g_j(a) + p_j(g_j(a)) \right]$$

$$J^s = \left\{ j \in J : g_j(a) + q_j(g_j(a)) \geq g_j(b) \right\} \quad \text{and,}$$

$$J^q = \left\{ j \in J : g_j(a) + q_j(g_j(a)) < g_j(a) \leq g_j(b) + p_j(g_j(b)) \right\}$$

A credibility index $\rho(aSb)$ (5.15) might later weaken the $c(aSb)$ index by possible veto effects. A complete preorder is finally suggested considering preorders suggested by the distillation processes as described in ELECTRE III global principles in Figure 5.6.

$$\rho(aSb) = c(aSb) \prod_{j \in J: d_j(aSb) > c(aSb)} \frac{1 - d_j(aSb)}{1 - c(aSb)} \quad (5.15)$$

5.4 Case study

The rapid pace of the technology evolution forces companies in the electronic sector to increase the variety and the quantity of their products. Thus, improving operations and production techniques becomes a must in a highly competitive market. In this context, the part family formation problem as described in this paper were solved within a big North American actor in the electronic industry.

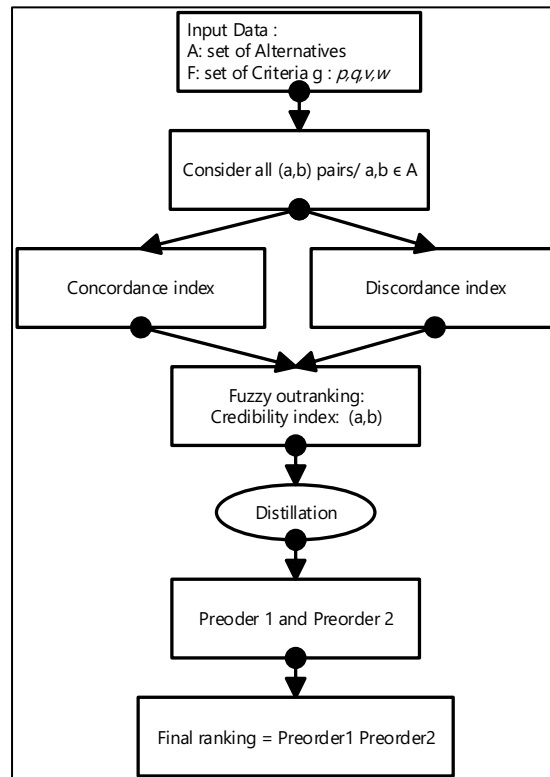


Figure 5.6 Global principle of ELECTRE III method

5.4.1 The case study general framework

From order reception to delivery, all part numbers are grouped into families with special coding depending on their technical specifications to feed the resource planning software. Such coding is not necessarily suitable for all the operations the product (part) is assigned to. This issue is caused by the incompatibility between test operations and coding system. The general framework corresponding to the procedure, that is currently in place in the partnering company, is shown in Figure 5.7. The figure also shows the new methodology (central portion of the figure) within the old process from importing data, creating operational work sheets and optimizing production planning to the execution of operations. The production planning optimizer is a tool that takes its inputs from the operations roadmap sheet of the products in order to estimate resource usage and delivery dates considering the company priorities and costs. It also plans the production and calculates the tool load and the machine load. It's worth mentioning that operational worksheets are often created based on the inadequate classification

described previously. In the case study presented below, the two-stage clustering method for part family formation is applied at the important stage of the production process related to testing of the (electronic) components, called "testing" below for simplicity reasons.

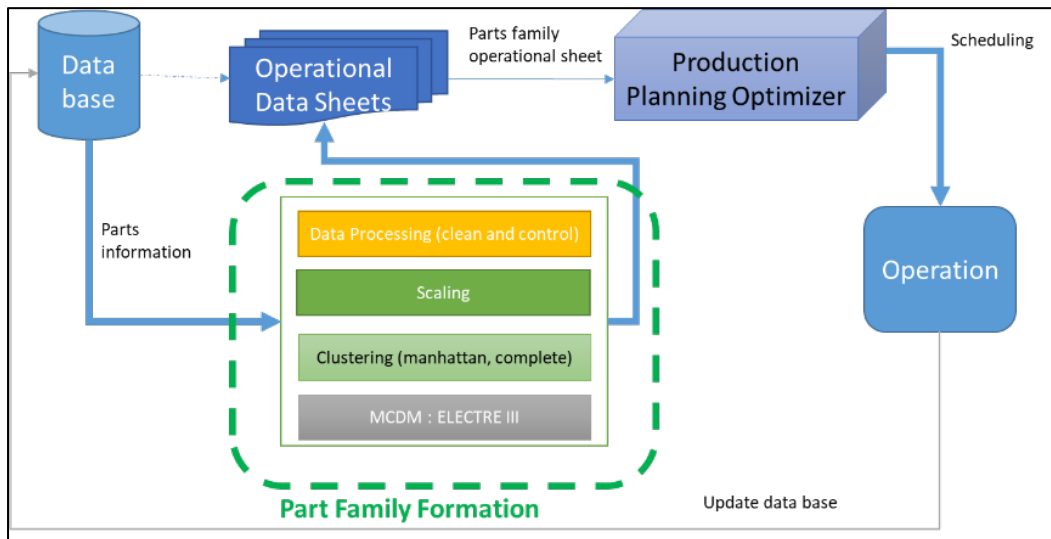


Figure 5.7 The case study general framework

In the test department, parts are regrouped into families based on the operation platform, test temperature, test time, retest rate, lot size and some other testing parameters (attributes). An example of an operational worksheet is presented in appendix A. The database update is not considered in this part family formation. The coding is based on the product technological and technical specification. In this study, a more convenient part family grouping is proposed based on main criteria form the operational worksheet.

5.4.2 Adaptation of the proposed two-phase method to industrial case of partner company

In this section, the methodology described in section 5.3 is applied in our case study. The full procedure containing two phases: part family formation and decision making, is described below and followed by the results.

5.4.2.1 Phase 1 – Part family formation

In addition to used clustering algorithm parameters, a set of data input is needed to define objects to cluster and its attributes. In this example only the 3 parameters are considered: test time, retest rate and lot size for parts classified by operation code and gate. The operation code has the encoding “BMO-Platform-number-temperature”. Used variables are defined as follows:

PN: Part Number

OC: Operation Code

Gate: testing gate

Date: test date

Test program

TT: part real Test Time

RR: part real Retest Rate

LS: part real Lot Size

5.4.2.2 Data processing

The raw data extracted from the company database are not clean. The cleaning step is then mandatory to get the right inputs for the right results. Using SPSS for the data extraction and R for data cleaning, a total of 24 data sets with different dimensions are obtained considering operation code and gate. We concentrate our case study on one of those data sets. For each data set a second cleaning is applied, only records with a $LS \geq 10$ is considered, operations with smaller LS are not for production but engineering purpose. Only the latest test program, for the same operation, is considered. If many records exist for the newest test program, a simple average is calculated for the three main criteria: TT, RR and LS. Real parameters are read directly from within the company’s system. There is no filter on them. Finally, the input data set is composed by: PN, TT, RR, LS.

5.4.2.3 Clustering algorithm

The implementation of the clustering algorithm follows the line described in Figure 5.7. Scaling is based on the production function which is used for both planning the test procedures and assessing their performances. The production function depends on the chosen attributes (TT, RR, LS) in a complex way and also on some additional parameters such as operation efficiency (%), structure of testing chamber, initial test time, test overhead time, and some others. The detailed formulation for Production function development is provided in the Appendix B, where the following final form is obtained:

$$P(TT_i, RR_i, LS_i) = \sum_{i=1}^n \frac{B \times TT_i}{(TT_i + TT_i \times RR_i) (TT_i + T_0 + C/LS_i)} \quad (5.16)$$

Here B and C are the constants (for a particular case studied $B = 3600$, $C = 840$). Expression (5.5) is a particular case of the generic formulation given in section 3.2 and can be obtained from (3.1) setting:

$$\varphi_0 = \frac{A_1}{\varphi_2 \times \varphi_3}, \varphi_2 = A_1 \times A_2, \varphi_3 = T_0 + \frac{C}{A_3} \quad (5.17)$$

The results obtained for some data sub-sets along the validation tests with industrial partner are shown in Tableau 5.1 Example of the scaling for the data from industrial partner.

Tableau 5.1 Example of the scaling for the data from industrial partner.

Set identifier	Dimension n	Mean (TT)	Mean (C/LS)	Mean (LS)	W_{RR}	W_{LS}
3	17	31	2.5	500	0.33	1/200
7	47	96	5.36	181.5	1.1	1/34
13	83	850	54.5	22	9.2	2.5
10	110	180	47.8	21.4	2.3	2.25

The AHC (Agglomerative Hierarchical Clustering) is then applied to form part families. The number of possible families is from 1, when all parts form a family, to the total number of parts n , when each part is a family itself, it represents the clustering dendrogram (Appendix C).

Considering the data set number 7: $CPRE_l$ and $CARE_{jl}$ were calculated. $CPRE_l$ is the clustering production relative error where l is the number of families in the clustering l . Attributes are TT, RR and LS. Max errors for each attribute are also calculated.

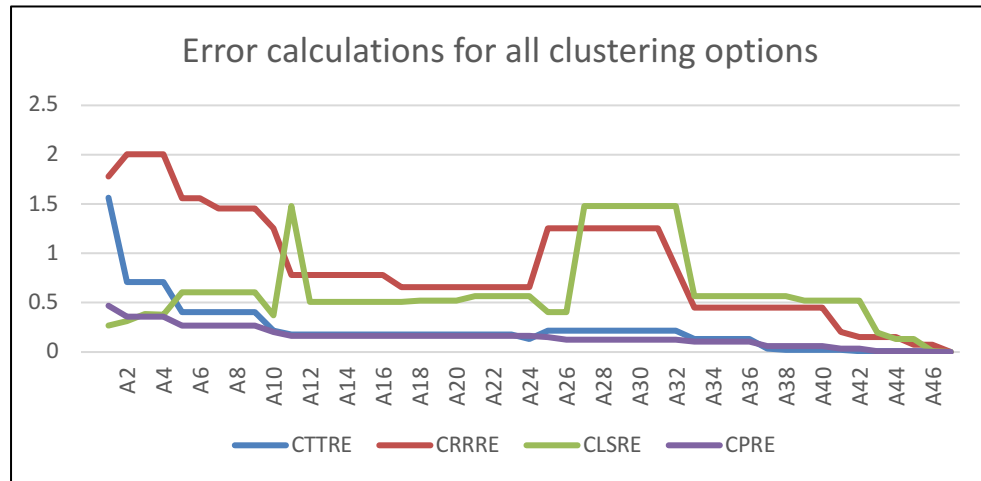


Figure 5.8 Error calculations for all clustering options for data set#7

The desired behaviour of the $CPRE$ is to decrease when the number of family increases. It is not the case for the $CTTRE$, $CRRRE$ and $CLSRE$ as linking parts in order to decrease the number of families or to increase it when dividing one family in two families do not guarantee that the maximum error on all the attributes will decrease consequently. It is explained by the fact that linking or dividing is based on the distance calculations and not on individual attribute values. Thus, increasing error observed on $CLSRE$, unlike $CTTRE$ and $CRRRE$, between $A9$ and $A12$ is explained. Same behaviour is observed for $CRRRE$ between $A24$ and $A27$. The $CTTRE$ was decreasing, except from $A24$ and $A33$ where it slightly increases, thanks to its important weight in both production and distance formulas. So, the model tried to keep the $CTTRE$ decreasing because of its importance. The $CPRE$ is still decreasing which confirms that the model and calculations are correctly behaving.

5.4.2.4 Clustering performance

Based on the elements to cluster, an objective estimation of the optimal number of clusters is possible using many indexes such as: Davies-Bouldin index, Dunn index, Silhouette index. 30 indexes were calculated to help identifying the optimal number of clusters. In, Hubert statistic values and Dindex values are plotted to indicate the optimal number of clusters. The modified Hubert statistic value (Hubert & Arabie, 1985) is an adaptation, in the context of clustering, of the index Γ of correlation between two vectors of data A and B with the same size (Desgraupes, 2017). This index, when its value is high, helps to identify compact clusters. When a significant knee is observed in the plot of normalized Γ versus q , the number of clusters, to the best number of clusters. A significant peak in the plot of the second differences values of normalized Γ confirms the optimal number of clusters (Charrad, Ghazzali, Boiteau, Niknafs, & Charrad, 2014).

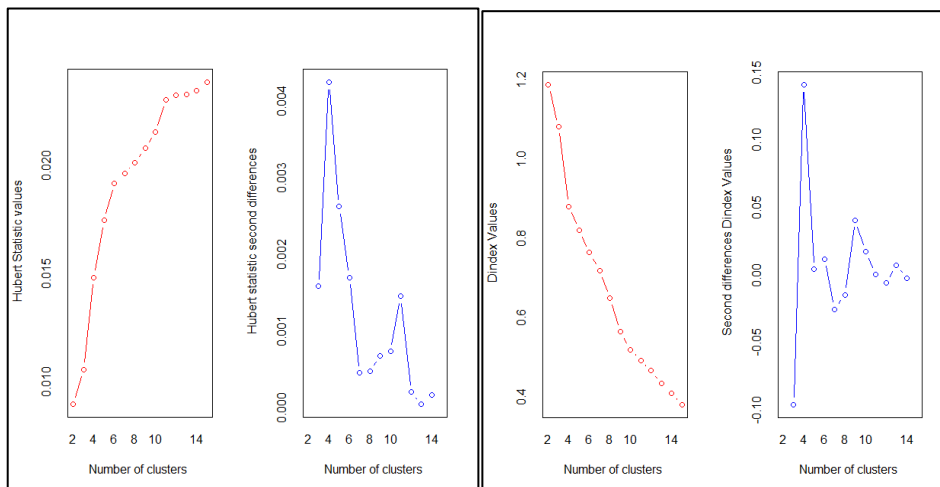


Figure 5.9 Hubert and Dindex statistical indexes plot to select the best number of clusters

Dindex (Lebart, MORINEAU, & PIRON, 2000) is based on clustering gain on intra-cluster inertia. This index should be minimized. In the plot, a sharp knee links to the optimal number of clusters which corresponds to a significant decrease of the first differences of clustering gain

versus the number of clusters. A significant peak in second differences of clustering gain confirms the optimal number of clusters (Charrad et al., 2014; Desgraupes, 2017).

The final recommendation of the 30 indexes is to have 4 families for 47 parts to clusters. The proposed result is not acceptable by the decision maker as the error is significantly high. The decision-making will, then, require the decision maker to express their preferences to decide about the optimal number of families in that special case.

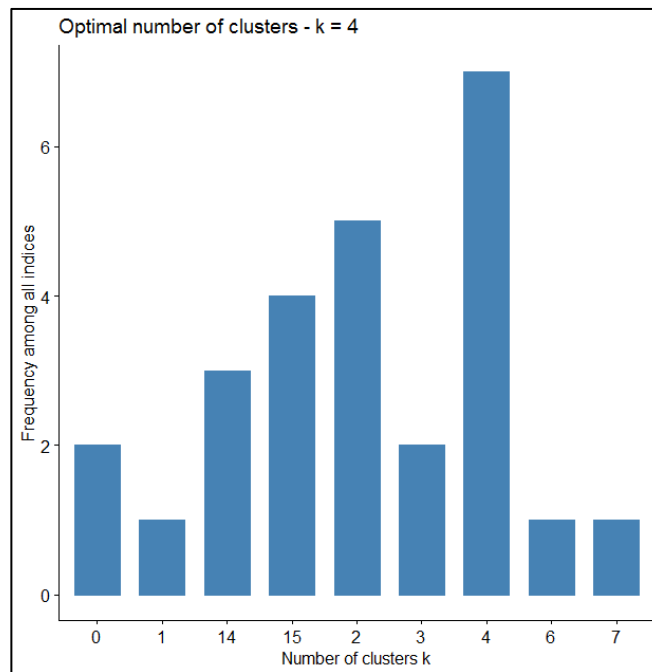


Figure 5.10 Optimal number of clusters as given by statistical indexes

5.4.3 Phase 2 – decision making process

To respond to the incapability of objective clustering indexes to give an acceptable and robust solution to the decision maker, ELECTRE III were performed, as described earlier. The method inputs are: the performance matrix expressing the value of each criteria ($CPRE_l$, $CTTRE$, $CRRRE$ and $CLSRE$) for each alternative. Indifference p , Preference q , Veto v and weight w thresholds for each criterion were determined using the simple multi-attribute rating technique SMART. In the SMART method, two phases are processed. The users rank criteria

from the most important to the least important and bottom to up by assigning scores. Both results are compared, and the weights are normalized. The results given by the statistical indexes from the NBClust function in R and ELECTRE III are completely different. As the clustering context requires the decision maker preferences, the best option given by the MCDM method were taken.

Tableau 5.2 Best number of clusters using the 30 clustering indexes and the best number of clusters giving by ELECTRE III.

Set identifier	Best number of clusters using the 30 indexes	Best number of clusters using ELECTRE III
3	3	9
7	4	18
13	21	51
10	15	46

Performances comparison considering CTTRE, CRRRE, CLSRE and CPRE is presented in Tableau 5.3. The best number of clusters provided by ELECTRE III improved *CTTRE*, *CRRRE* and *CPRE* but not the *CLSRE*. The solution is accepted and preferred by the decision as the LS is the least important attribute. The noticed improvements are very important to our partner's planning accuracy and their repercussion.

Tableau 5.3 Performances comparison between the actual situation, the theoretical model and the proposed model for set #7.

	CTTRE	CRRRE	CLSRE	CPRE
Best number of clusters using the 30 indexes	70.6%	200%	37.85%	35.81%
Best number of clusters using ELECTRE III	21.48%	85.61%	147%	12.57%
Actual clustering	NA	NA	NA	47%

The new part family formation solution provided an important improvement to our industrial partner. The *CPRE* decreased from a maximum of 47% to 12.57% which contributes to more accuracy in operations management and related departments such as finance department for billing and cost estimation and production department for work and machine load. The proposed solution can be applied to many other departments to solve the fuzziness and inaccuracy of the part family formation.

The proposed model has multiple implication in both industrial and scientific sides. It improved the data rejection rate of data and strengthened the security layer between raw data and planning software, reducing the production error for a more accurate planning and building a robust and credible process for part family formation to maintain competitiveness. In addition, scientifically, it extended the use of machine learning in an industrial context, integrating two scientific fields: AI and MCDM to build a practical model in group technology management, adapting the clustering algorithm to a real-life problem and introducing new specific error calculation.

5.5 Conclusion and future work

In this study, a two phases clustering model for part family formation is developed to optimize resources and planning. Although existing approaches to part family formation provide good solution under changing and volatile demand, there is no integrated study which considers both fixed machines configuration and production limits uncertainty. So, there is an important gap in the literature on this topic. While using the clustering algorithms, determining the optimal number of families is very important to assess grouping objectives (Kassambara, 2017) because of the proved insufficiency of statistical clustering indexes when it comes to industrial applications.

The presented approach aims to handle the objective-based clustering in part family formation problems under uncertainty while providing flexibility and efficiency. It consists of several concepts and approaches to support this goal such as clustering algorithm, similarity

calculation and multicriteria decision making techniques. The proposed integrated methodology enables the part family formation and planning optimization simultaneously. The performance of the approach is tested in a case study in an important electronics company. The obtained results, when compared to the methods currently used in the company, show that the proposed approach provides promising solutions. The introduced performance measures also show that the proposed approach has the ability to efficiently manage family formation under uncertainty.

In the described solution, the optimal number of families was determined considering objectives and uncertainty. Since, part's arrival is dynamic, the number of families has to be recalculated. Reforming families is a costly task in terms of time and settings. That is why, considering the dynamic approach, it is important to handle the demand volatility and the incurred costs. These dynamics can be modelled in order to obtain more realistic approach while maintaining flexibility and efficiency. In addition, in the proposed approach, some other attributes can be considered such as obsolescence and manufacturing parameters change between operations. These dynamic aspects are currently under study and are subject of our future work.

CHAPITRE 6

A SUSTAINABLE MULTICRITERIA DECISION FRAMEWORK FOR OBSOLESCENCE RESOLUTION STRATEGY SELECTION

Imen Zaabar ^{a*}, Raul Arango-Miranda^b, Yvan Beaugard^a and Marc Paquet^c

^a École de Technologie Supérieure, mechanical engineering department, 1100 Rue Notre Dame O, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

^b École de Technologie Supérieure, construction department, 1100 Rue Notre Dame O, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

^c École de Technologie Supérieure, systems engineering department, 1100 Rue Notre Dame O, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

Article published in “Sustainability” journal, July 2021

Résumé

L'obsolescence des composants a un impact majeur sur le cycle de vie des produits, le système de production et l'environnement, engendrant des conséquences opérationnelles, logistiques, de fiabilité et de coûts. Si les modèles de résolution actuels sont axés sur les coûts, de nombreuses études ont démontré que l'obsolescence technologique joue un rôle prépondérant dans le problème des déchets électroniques. Cette étude propose, à partir de la littérature académique et d'avis d'experts, un cadre de décision durable pour la sélection d'une stratégie de résolution de l'obsolescence (ORS). Ce cadre intègre quinze critères, répartis en quatre dimensions : économique, environnementale, sociale et technologique. Des méthodes d'aide à la décision multicritères (MCDM) sont proposées pour sélectionner la solution la plus durable. Une étude de cas a été menée, au cours de laquelle la pondération des critères et la performance des alternatives ont été évaluées par cinq experts des domaines de l'environnement, de l'économie, des ressources humaines, de l'obsolescence et de la gestion des opérations. Les résultats des différentes méthodes MCDM ont été comparés à la décision finale afin d'évaluer l'efficacité. L'utilisation du cadre proposé a amélioré le processus décisionnel, l'intégration du développement durable ayant un impact significatif sur la stratégie choisie et,

par conséquent, sur la performance de l'entreprise. Outre ses contributions industrielles, cet article propose une nouvelle perspective de recherche sur la gestion durable et robuste de l'obsolescence afin de gérer efficacement le nombre et la gravité croissants des composants obsolètes.

Abstract

Parts obsolescence has an important impact on the product life cycle, the manufacturing system and the environment leading to operational, logistical, reliability and cost implications. While current resolution models are cost-oriented, multiple studies have revealed that technological obsolescence is strongly involved in the electronic waste problem. In this study, based on academic literature and expert opinions, a sustainable decision framework for obsolescence resolution strategy (ORS) selection is proposed. It consists of economic, environmental, social and technological dimensions, integrating a total of fifteen criteria. Multicriteria decision-making (MCDM) methods are suggested to select the most sustainable solution. A case study was performed where the criteria weights and the alternatives performance were judged by five experts from the fields of environment, economy, human resources and obsolescence and operations management. Results from different MCDM methods were compared to the actual decision to evaluate their effectiveness. Using the suggested framework improved the decision process as integrating sustainability had a drastic impact on the selected strategy and consequently on the company's performance. In addition to its managerial insights, this paper provides a new re-search perspective to sustainable and robust obsolescence management to effectively handle the increasing number and severity of obsolete components.

6.1 Introduction

Component obsolescence is a significant problem in our modern highly technological market. It is a result of the rapid evolution of technology by introducing new components with higher performance and additional features. It led to a growing pressure to upgrade components and systems. Obsolescence is defined as the loss of functions of a component or a system (hardware

or software) so it cannot accomplish its essential purposes or is no longer useful because it is unsustainable, high-priced to repair, defective or the product is no longer available for purchase in its original form from the original manufacturer (Bartels et al., 2012). It specifically rises due to the mismatch between the life span of the product and the parts of the system. The conflict concerns sustainment-dominated systems, which take many years to design and manufacture and are typically maintained for decades such as aircraft and submarines, as well as nowadays technological products such as computers or mobile phones. They are usually composed of “commercial off-the-shelf (COTS)” components that are highly dependent on market tendencies and technological changes. COTS components have reduced life cycles and experience obsolescence rapidly. As of 2006, QTEC Solutions (an international leader in components obsolescence management) estimated that around 3% of the global pool of electronic parts becomes obsolete every month (QTEC, 2006). A more recent study evaluated that over 350,000 components became obsolete in 2013 (Pingle, 2015). It reflects the extent of the environmental and technological problem; the modern industry is fronting. The rapid pace of technology makes the problem more global and impacts even products with shorter life cycles. Every 24 months, computers’ processing speed doubles, known as Moore’s law, which leads to constant upgrading of components or systems such as military and technological products. Either at the production step or at the recycling, electronics have an important environmental impact as high-tech parts and equipment production require a broad range of materials as well as energy. Often, technical materials required in electrical and electronics are critical raw materials and rare earth elements. In addition, ultra-clean components and intermediate products require energy, water and chemicals (Eionet, 2020). Thus, electronics waste is one of the world’s fastest growing waste streams with an annual growth rate of four percent (Baldé et al., 2017) whose main driver is technological obsolescence.

Although its history is associated with the (maritime) defense industry, many non-defense systems face similar difficulties, such as avionics, oil well drilling and automotive industry (Seuren et al., 2018). Nowadays, decisions regarding obsolescence management across all these industries are often based on experience and intuition, leading to an increasing need to reduce the negative effects of obsolescence issues. However, there is a lack of knowledge of

how to effectively choose obsolescence mitigation and resolution approaches to reach this goal. Selecting the most suitable obsolescence resolution strategy is then a crucial decision for the system, the manufacturer and the environment where multiple factors are considered (Adetunji et al., 2018; Reimert, 2020) such as cost, technology, functionalities, etc. Recent studies revealed that the high rate of obsolescence in the electronics industry has led to one of the fastest-growing waste streams in the world (Echegaray, 2016). As a simple example, computers are manufactured from over 1000 materials, many of which are toxic and contribute significantly to the e-waste stream, estimated at 53.6 million tonnes in 2019 (Ewastemonitor, 2020). Thus, considering sustainable factors becomes crucial as obsolescence is a major cause of component deterioration (Sabbaghi & Behdad, 2017). Our paper seeks to build a sustainable framework to support decision making in obsolescence management either at the reactive, proactive or strategic level from the design to the end of life of the system.

The paper is organized as follows: first, we present a literature review of obsolescence resolution strategy selection models and the considered criteria, alternatives and decision process. Second, the proposed ORS selection framework is presented. Then, the model is applied with an example from the avionics industry. Finally, our conclusions are summarized, and potential studies are discussed.

6.2 Literature review

The study is mainly related to two streams of research in the literature: obsolescence management, in particular the resolution/mitigation strategy selection, and sustainability. The part's obsolescence problem is also referred to as an "end-of-life (EOL) problem" or "DMSMS" (diminishing manufacturing sources and material shortages) in the literature and it can be divided into two branches. One focuses on forecasting the obsolescence risk of parts and the demand trend after obsolescence occurred. Statistical methods are used extensively in these works, and representative research for this branch can be found in (Jennings & Terpenney, 2016; Sandborn, 2017). Our paper is more related to the second branch which emphasizes the prescriptive perspective, investigating how to minimize part obsolescence impact and maintain

satisfactory service levels with various strategies. Obsolescence is unavoidable, and the current methods of mitigating obsolescence are expensive and inefficient. For example, obsolescence is estimated to cost the U.S. Department of Defense (DoD) more than USD 750 million annually. This estimate means that more than USD 9 billion has been wasted over the past 12 years (Adetunji et al., 2018). That is why multiple studies tried to solve the problem at three different management levels: reactive, proactive and strategic (Bartels et al., 2012). Reactive management addresses the problem after the component or part has already become obsolete or received a product change notification from the original component or part manufacturer. Proactive management addresses obsolescence before it occurs. This strategy is used for critical parts or systems that have a high risk of becoming obsolete or when the availability of the component or system will be low after it becomes obsolete. It employs forecasting methodologies to predict obsolescence dates for the various parts of a product, analyzes the risk of critical parts in a bill of material (BoM) and takes the necessary steps to manage obsolescence (Jennings et al., 2016). Strategic management uses the system status, forecasts the DMSMS risk and determines the status of expected needs of inventories and spares. It seeks for the optimal mix of reactive mitigation approaches and design refreshes (minor and major) that will minimize life-cycle costs (e.g., maximize cost avoidance) while continuing to meet all system requirements. Strategic management is also used for strategic planning, life-cycle optimization and long-term business case development to support the system, and it often combines reactive and proactive strategies (Adams, 2005; Bartels et al., 2012; Wilkinson, 2015). Although obsolescence management is recommended over the three described management levels, it is still mainly reactive where decision making represents a crucial part of the process (Bartels et al., 2012; Wilkinson, 2015).

The second stream to which our research is related is sustainability as obsolescence risk is tightly related to environmental concerns such as e-waste and the usage of rare materials in addition to multiple other perspectives such as ecosystem services, economic and financial issues, social issues and operating licenses. Sustainability is not considered an easy task since it involves high levels of corporate management, production and consumption by society. In this sense, ecological, social and economic pressure is increasing in industrial organizations

(Büyüközkan & Karabulut, 2018) as the pollution generated by them has increased to levels never reached before (Li & Mathiyazhagan, 2018). The measurement and monitoring of sustainability in industrial organizations based on indicators promote the simplification and quantification of information on triple bottom line aspects (Singh, Murty, Gupta, & Dikshit, 2009). Sustainable production means producing less, with higher quality and durability, lower environmental impacts and higher profitability.

The first attempt to help decision makers in obsolescence management was an approach based on economic analysis (Porter, 1998). The work provided a formulation of the net present value of last-time buy and design refresh planning. The model looked for a trade-off between the two possible strategies. It helps obsolescence engineers to develop a solution by providing a break-even year chart that can give the best year for redesign. This model allows a single design refresh at a time. The last-time buy (LTB) strategy is widely studied because of its common use in practice (Shi & Liu, 2020). Feng et al., 2007 established a list of factors in cost calculation. It includes procurement cost, inventory cost, disposition cost and penalty cost. Acevedo-Ojeda et al., 2020 proposed a mixed-integer programming formulation to consider parts obsolescence in a two-level lot-sizing problem.

Design refresh has been well studied too. A model developed in Singh & Sandborn, 2006 is based on cost analysis and provides the optimum design refresh plan in order to go through the life sustainment cost of the product. It optimizes the cost over multiple design refreshes. Product life evolution was simulated by Hu & Bidanda, 2009 using stochastic dynamic programming to make decisions with a Markov decision process. Multiple other studies tried to solve the obsolescence resolution problem using different techniques such as the restless bandit model and Markov decision process (Kumar & Saranga, 2010), integer programming (Zheng et al., 2015), graph theory and mixed linear programming (Meng et al., 2014). The limitation of the previous research is that it is cost-oriented and considers only two resolution strategies (last-time buy and redesign) from all resolution profiles, ignoring then the sustainable dimension of the problem.

Other studies considered obsolescence as a criterion in the decision-making process of many problems such as the maintenance of the drinking water and sewer network (Werey et al., 2018), for legacy application software obsolescence assessment (Bowlds et al., 2018) and in the material purchasing problem where (Battini et al., 2018) considered technology obsolescence and developed a bi-objective model to support managers in their decisions in identifying a sustainable quantity purchase when a cap and trade mitigation policy are present..

To the best knowledge of the authors, only Pingle, 2015 and Adetunji et al., 2018 studied the ORS selection more globally by considering multiple criteria and alternatives. While Pingle, 2015 applied MAUT (multi-attribute utility theory) to select the best replacement strategy, Adetunji et al., 2018 used TOPSIS (technique for order of preference by similarity to ideal solution) and Monte Carlo simulations to rank alternatives during the product design phase. None of them considered sustainability in decision making despite the fact that the environment is directly impacted by electronics waste.

Finally, from a methodological perspective, this paper contributes to the application of a multicriteria decision-making model in obsolescence management. (Ewastemonitor, 2020)

And (Herat, 2007) demonstrated the lead role of obsolescence in environmental problems and specifically in accumulation of electronic waste. Our goal in integrating sustainability in obsolescence management is to provide an efficient solution to both ORS selection and waste management problems.

To summarize, based on the extensive literature review, our paper studies the obsolescence resolution strategy selection problem considering sustainability. Obsolescence risk can be considered at any stage of the product life cycle. It will be managed efficiently providing sustainability and robustness. To the best of the authors' knowledge, this research is among the first to consider such a model setting, particularly, including the environment axis in the ORS problem and deriving the most sustainable solutions.

6.3 Materials and methods

Given the multiple elements that affect the ORS selection when a component becomes obsolete such as cost, technological and functional improvement, the stakeholder's constraints and the solution sustainability, no single strategy focusing on a single element can provide a confident assessment. The best resolution strategy for component obsolescence would be based on several criteria rather than a single element. In addition to the complexity of the problem, the subjectivity of ORS selection plays a central role in the obsolescence management process. (Wilkinson, 2015) discussed a similar challenge of optimizing multiple objectives for all obsolescence management levels when looking for the best resolution/mitigation strategy. In this paper, we develop a multicriteria decision-making framework for ORS selection that supports the problem's nature and complexity.

Obsolescence resolution/mitigation strategy goes through four steps: obsolescence notification, gathering information, resolution strategy selection and implementation and documentation. Few decision models were used within step 3, where multiple criteria and alternatives have to be considered in an uncertain and complex decision environment. In this paper, we consider the reactive management level to make it simple and easy to use since it is the most common management level within industry (Seuren et al., 2018).

One of the best-suited tools to help in the decision making considering the uncertainty and the complexity of the decision are the multicriteria decision-making (MCDM) or the multicriteria decision aid (MCDA) methods. Following the guidelines proposed by (Guitouni & Martel, 1997) to choose an appropriate MCDM/MCDA method, an outranking non-compensatory approach dealing with a discrete set of alternatives with mixed information structure was adopted. In a non-compensatory strategy, the decision maker may state that the criteria are important enough to refuse any kind of compensation or trade-offs. The usage of non-compensatory strategy provides better satisfaction for the decision makers (Adelbratt & Montgomery, 1980; Kottemann & Davis, 1991).

The adopted decision method is based on a highly regularized operating environment where compensating criteria is not preferred. Thus, compensatory single synthesizing approach such as MAUT (multi-attribute utility theory) or AHP (analytic hierarchy process) was rejected (although some techniques developed within AHP framework were used to determine the criteria weights). (Ziemba, 2019) related compensation degree and the sustainability strength of the MCDM methods and proved that sustainability and compensation are opposite: the higher compensation is, the weaker sustainability will be. Based on the nature of the problem, (Guitouni & Martel, 1997) guidelines and (Ziemba, 2019) study, ELECTRE III (*ELimination Et Choix Traduisant la REalité*) and PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) were selected to be used in this work for their support to the discrete, outranking and non-compensatory nature of the problem and for their substantiated effectiveness in similar contexts.

The major difficulty facing an MCDA methodology lies in the assessment and the modeling of the decision-maker (DM) preferences that affect both the decision process and the solution (Guitouni & Martel, 1997). In this paper, decision-maker preferences are reflected in the criteria weights and the four binary relations established using the concepts of thresholds, concordance and discordance indexes. The four binary relations, for the pairwise comparison of alternatives, are indifference situation ***I***, preference situation ***P***, weak preference situation ***Q*** and incomparability ***R***.

To develop the MCDM framework for the ORS selection problem, the process was divided into two stages: construction and exploitation, as recommended by (Guitouni & Martel, 1997). First, at the construction stage, relevant criteria were determined based on literature then filtered by experts in the fields of environment, economy, human resources, technological obsolescence and operations management. The final criteria set ***C*** to be considered is described in Tableau 6.1. Unlike the criteria set which is valuable for all obsolescence cases, criteria weights need to be calculated at each obsolescence notification.

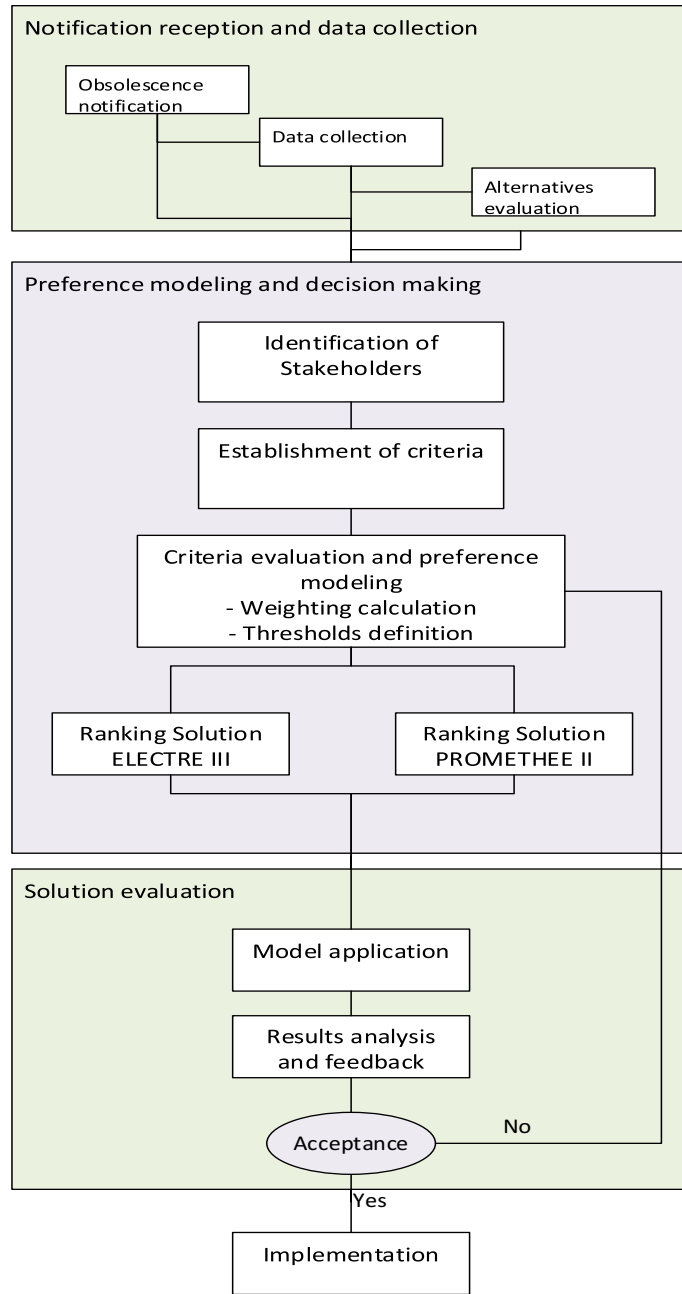


Figure 6.1 Research methodology chart

It is completely natural that cheap parts' cost will not be the most important criterion in the decision process compared to the ORS implementation time. For critical high-end parts, both requalification and technology readiness will be the most important. Determining weights is,

then, performed case by case. Both swing method and pairwise comparison were applied. Sets W_1 and W_2 for weights generated from both techniques are normalized and validated.

The exploitation stage involves the aggregation (calculation) and the results (recommendation) steps. The general simplified methodology consists of selecting or recommending the best ORS strategy that satisfies the three actors of the problem: the manufacturer, the customer and the stakeholders. A summary of the research methodology is presented in the Figure 6.1.

Tableau 6.1 Criteria table

Criteria's Categories	Criterion	Assessment
Economic	Cost	min
	Procurement	max
	Vendor reliability	max
	Implementation and training time	min
	Customer satisfaction	max
Environmental	Pollution	min
	Hazardous material	min
	Resource usage	min
Social	Employment opportunities	max
	Security and work environment	max
Technological	Functionality	max
	Technology readiness level	max
	Lifetime duration/extension	max
	Open architecture and standards	max
	Software compatibility	max

6.3.1 Alternatives

There are many possible resolution strategies to obsolescence problems. Their range in complexity is from a simple part substitution to a major redesign of the product. Bartels et al., 2012 provided the most complete list of obsolescence resolution strategies. A total of eleven general solutions were identified. They form the alternatives set A in the proposed multicriteria decision framework. (Shaw, Speyerer, & Sandborn, 2010) ranked these alternatives in approximate order of increasing cost. The negotiation with the manufacturer to keep producing the component and the usage of the existing stock are both cost-free solutions but rarely

considered. The reclamation strategy is also a cheap solution that allows one to obtain a small number of obsolete parts by salvaging or cannibalizing used parts that still have a useful remaining life. For medium-cost solutions, alternate part, part substitution, uprating, aftermarket sources and emulation can be considered. While an alternate part is a part with equivalent or greater performance than the replaced part, part substitution is a complete process of selecting a part with fewer capabilities than the part it replaces. The selection process considers the form, fit and function criteria for a component designed as a replacement part. Uprating is a special range of part substitution. It is the process of assessing the ability of a part to meet the functionality and performance requirements of applications where it is necessary to use it outside the manufacturer's specification range. Parts can be sourced from aftermarkets too (aftermarket refers to the period after the original manufacturer has moved a part out of production). This solution has high risks of counterfeit (Sandborn, 2013). The choice has to be made carefully between approved sources that provide finished parts or those that remanufacture parts and unapproved sources or brokers. Electronic parts can be emulated. Emulation refers to the process of redesigning obsolete electronics from their slash sheets, datasheets, test vectors and other information. In some other studies, emulation is considered as part substitution of alternate parts.

6.3.2 Criteria

While most of the studies for obsolescence management considered mainly economic and technological factors, Fiksel, 2006 believed that considering global sustainability is essential for effective decision making since industrial, social and ecological systems are closely linked. In this paper, a sustainable set of criteria is considered to help make decisions in obsolescence management. In addition to the basic economic and technological criteria categories, environmental and social criteria are added. The strong relationship between technological obsolescence and the increasing stream of e-waste was demonstrated in multiple studies (Echegaray, 2016; Efendigil, Ozkir, Demirel, Demirel, & Ondemir, 2012; Ewastemonitor, 2020) which made the environmental factors a priority. Another example of a factor influencing the increase in the obsolescence of electronic components is the need to comply

with increasingly strict and demanding legislation in the updated European Union regulation in this area of Restriction, Assessment and Authorization of Chemicals (REACH) and the Restriction of Hazardous Substances Directive (RoHS).

The criteria set in this study is based on sustainability indicators for industrial organizations developed by Feil et al., 2019, the previous work on obsolescence decision making (Adetunji et al., 2018; Herald & Genaw, 2006) and agreed upon by the case study decision makers. The sustainable framework is inspired by Feil et al., 2019; Hemdi, Saman, & Sharif, 2010; Shokrian et al., 2015, and the criteria set was divided into 4 subsets: economic, environmental, social and technological as described in Tableau 6.1.

6.3.3 Criteria weights

Criteria weights are used to run the selected outranking methods and should be calculated with the understanding that set W represents weights of relative importance of the different criteria. They are non-negative numbers and independent from the measurement units of the criteria.

The weights have an important role in measuring overall preferences of alternatives. Their assessment of the criteria is not straightforward. It involves the priorities and perceptions of the decision maker. In this study, two weighting methods are used and compared to help express the decision makers' preferences. The first method is the value swinging method. It assigns to the most important criterion the highest weight in a selected weighting range (100 to 1–100 scale). First, voters assign 100 over the value measures based on their importance. They identify and discuss significant differences and revote until they agree on the ranking of value measures. A second tour of voting is performed to determine weights following the earlier agreement. The weights are then normalized, and the outliers are discussed. Voting continues until everybody agrees on the weights (Pingle, 2015). This method's strength is that it considers the range of each criterion, and it is a relatively simple and straightforward method. However, it does not allow participants to directly compare criteria between each other. That is why the second method is the pairwise comparison method. It consists of calculating the

relative importance coefficient α_{ij} for all criteria pairs, where $\alpha_{ij} = \frac{1}{\alpha_{ji}}$ where i and j are two different criteria. α_{ij} value is equal to 1 if criterion i and criterion j are equally important, 3 if i is slightly more important than j , 5 if i is more important than j , 7 if i is strongly more important than j and 9 if i is absolutely more important than j . A pairwise matrix is built and normalized by making equal to 1 the sum of the values on each column. Each normalized matrix entry is calculated by $\bar{\alpha}_{ij} = \frac{\alpha_{ij}}{\sum_{l=1}^m \alpha_{lj}}$, where m is the number of considered criteria. Finally, the criteria weight vector w is calculated by calculating each row of the normalized pairwise matrix where $w_i = \frac{\sum_{l=1}^m \bar{\alpha}_{il}}{m}$ (Saaty, 1980). The pairwise comparison method was extended later to handle fuzzy criteria comparison for fuzzy hierarchical analysis (Buckley, 1985).

Both weights from both methods are compared in order to get the most representative importance of the criteria. Weights are important and might have a large impact on the decision-making process. They will be used as an input to the selected outranking methods. The usage of pairwise comparison is limited to the criteria weights and is different the original technique of AHP.

6.3.4 Outranking

6.3.4.1 ELECTRE III

We relied upon outranking multicriteria decision-making process. In this context, ELECTRE III was selected among many other possible techniques for multiple reasons summarized in reference (Figueira et al., 2005). First, the context requires the use of non-compensatory aggregation procedures as the dropping on a given criterion cannot be compensated by the gain on another one. Second, the aggregation procedures usage is limited to decision problems with more than five criteria and less than twelve which can be a limitation on the use of our model. Under all of these constraints, ELECTRE III is considered the most adequate MCDM method that can support obsolescence resolution strategy selection problems.

ELECTRE III is used to rank alternatives. In this case, the alternatives are the resolution strategies. The multiple criteria decision-making method helps express the user preferences when a set of solutions must be ranked according to a set of contradictory criteria (Figueira et al., 2005). Outranking relations S are used to model preferences. S means “at least as good as”. Considering the two alternatives a and b :

- aSb and not bSa , i.e., aPb (a is strictly preferred to b);
- bSa and not aSb , i.e., bPa (b is strictly preferred to a);
- aSb and bSa , i.e., aIb (a is indifferent to b);
- Not aSb and not bSa , i.e., aRb (a is incomparable to b) alternatives.

The decision maker contributes to the ranking process by defining the three preference parameters: the indifference thresholds q , preference thresholds p and veto thresholds v . Each objective or criterion has its own thresholds that will be used later to rank the alternatives when it comes to calculating concordance and discordance indexes.

The outranking in ELECTRE III is based on concordance and discordance principle. Alternatives are compared to each other and generating concordance index and discordance index. While the concordance $c(aSb)$ (6.1) is considered when one alternative is as good as another, discordance $d_j(aSb)$ (6.2) calculates the possible rejection of one solution compared to another, basically when criteria are compared with consideration to thresholds:

$$c(aSb) = \sum_{j \in J^s} w_j + \sum_{j \in J^Q} \varphi_j w_j \geq s \quad (6.1)$$

$$d_j(aSb) = \begin{cases} 1 & \text{if } g_j(b) > g_j(a) + v_j(g_j(a)) \\ 1 & \text{if } g_j(b) \leq g_j(a) + p_j(g_j(a)) \\ \frac{g_j(b) - g_j(a) - p_j(g_j(b))}{v_j(g_j(a) - p_j(g_j(a)))} & , \text{ other wise} \end{cases} \quad (6.2)$$

where the coefficient φ_j decreases linearly from 1 to 0, and g_j describes the range:

$$\left[g_j(a) + q_j(g_j(a)), g_j(a) + p_j(g_j(a)) \right]$$

$$J^s = \{j \in J : g_j(a) + q_j(g_j(a)) \geq g_j(b)\} \text{ And,}$$

$$J^Q = \{j \in J : g_j(a) + q_j(g_j(a)) < g_j(a) \leq g_j(b) + p_j(g_j(b))\}$$

A credibility index $\rho(aSb)$ (6.3) might later weaken the $c(aSb)$ index of possible veto effects. A complete preorder is finally suggested considering preorders suggested by the distillation processes.

$$\rho(aSb) = c(aSb) \prod_{j \in J: d_j(aSb) > c(aSb)} \frac{1-d_j(aSb)}{1-c(aSb)}, \quad (6.3)$$

6.3.4.2 PROMETHEE

In general, multicriteria problems cannot be treated without additional information related to the preferences and the priorities of the decision makers. The information requested by PROMETHEE is particularly clear and easy to define for both decision makers and analysts. It consists of a preference function associated with each criterion as well as weights describing their relative importance.

Preference modeling regarding dominance relations is quite similar to ELECTRE III. Three dominance relations are considered: P , I and R , respectively, stand for preference, indifference and incomparability. They are defined below:

$$\begin{cases} \forall j: g_j(a) \geq g_j(b) \\ \exists k, g_k(a) > g_k(b) \end{cases} \Leftrightarrow aPb,$$

$$\forall j: g_j(a) = g_j(b) \Leftrightarrow alb \quad (6.4)$$

$$\begin{cases} \forall s: g_s(a) > g_s(b) \\ \exists r, g_r(a) < g_r(b) \end{cases} \Leftrightarrow aRb,$$

PROMETHEE II is selected to get a complete ranking. Its procedure is based on pairwise comparison of alternatives. After getting the weights set and the decision matrix, the amplitude

deviation $d_j(a, b)$ and the deviation evaluation $P_j(a, b)$ are calculated. It denotes the difference between the evaluations of alternatives a and b on criterion g_j .

$$d_j(a, b) = g_j(a) - g_j(b), \quad (6.5)$$

$$P_j(a, b) = F_j[d_j(a, b)] \quad \forall a, b \in A, \text{ where } 0 \leq P_j(a, b) \leq 1 \quad (6.6)$$

F_j is the preference function. It could be usual, U-shape, V-shape, Level, V-shape with indifference or Gaussian models. The preference function, depending on its model, requires none or many from the following parameters to be defined: q , the threshold of indifference, p , the threshold of strict preference, and s , an intermediate value between q and p . While P_j expresses the decision-maker preference for one criterion, the aggregated preference index $\pi(a, b)$ (6.7) is calculated to express with which degree a is preferred to b over all the criteria.

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^k P_j(a, b) * w_j \quad (6.7)$$

As soon as $\pi(a, b)$ and $\pi(b, a)$ are computed, positive outranking flow φ^+ (6.8) and negative outranking flow φ^- (6.9) are calculated to help complete ranking alternatives. When PROMETHEE II is considered, all the alternatives are comparable, and either P or I dominances (6.10) result. No incomparabilities remain, and alternatives are ranked.

$$\varphi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad (6.8)$$

$$\varphi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned} \varphi(a) &= \varphi^+(a) - \varphi^-(a) \\ aPb \text{ iff } \varphi(a) &> \varphi(b) \\ aIb \text{ iff } \varphi(a) &= \varphi(b) \end{aligned} \quad (6.10)$$

6.4 Case study

This case study was conducted at one of the largest international companies of vertical flights. The production facility includes various departments that handle numerous operations including the engineering department where change management is planned and executed. One of the most recurrent changes to make are those related to technological obsolescence. It happens unpredictably to any system at any stage of its life cycle.

Tableau 6.2 Performance matrix

Criteria	Unit	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
C (Cost)	USD	7665	23,500	9136	25,000	16,500	21,000	2200	19,000	22,000
PR (Procurement)	5-point scale	3	4	3	4	3	5	2	4	3
VR (Vendor Reliability)	5-point scale	4	4	5	5	3	4	5	4	5
T (Implementation and Training Time)	Days	10	14	12	28	10	14	4	12	20
CS (Customer Satisfaction)	%	65	80	60	63	68	68	55	87	80
PL (Pollution)	5-point scale	4	3	4	3	5	3	5	3	3
HM (Hazardous Material)	SI units	16	15	14	16	15	14	21	11	16
RU (Resource Usage)	9-point scale	6	3	6	4	4	4	6	5	5
EM (Employment)	5-point scale	3	4	3	4	4	4	2	4	3
SWE (Security and Work Environment)	9-point scale	7	6	5	6	6	6	4	6	6
F (Functionality)	5-point scale	3	4	4	5	3	4	3	3	5
TRL (Technology Readiness Level)	1–9 TRL levels	6	7	6	7	7	7	5	7	8
LTE (Lifetime Duration/Extension)	Months	24	40	36	40	36	38	12	40	40
OAS (Open Architecture and Standards)	0/1	1	0	1	0	1	1	0	1	1
SC (Software Compatibility)	%	80	65	75	50	75	60	90	82	70

Technological obsolescence is mainly related to the obsolescence of technology over time which means that it happens necessarily at the end of life of the product (Bartels et al., 2012) or at least after an important period of usage. With the fast technological evolution, technological obsolescence can be faced in the early stages of the product life cycle and even before the product's useful life starts, at the production stage, for example Sandborn, 2013. The problem is more significant for sustainment-dominated systems (Wilkinson, 2015), where the gap between these systems expected useful life and the interval of technological change continues to expand. The inherent impact of the obsolescence risk is hard to manage. The task of selecting the optimal resolution strategy is difficult. In this case study, the multicriteria decision-making method, described earlier, was applied to select the most suitable obsolescence resolution strategy considering sustainability criteria for one of the most sensitive parts of the system. First, fifteen selection criteria and nine alternatives were identified. The criteria weights were calculated using two different weighting methods involving multiple stakeholders and department managers. Following this, two ranking methods were applied to rank different resolution alternatives to solve the obsolescence case. The performance table is illustrated in Tableau 6.2. It includes nine alternatives or different resolution strategies and their performance on the fifteen criteria.

The first step after identifying the available alternatives and their performance is to determine the criteria weights. The results after normalization were close. The weights from both methods and the deviation Tableau 6.3 were validated and approved by the decision makers. A total of eight scenarios are considered and compared Tableau 6.4 and Tableau 6.6.

Tableau 6.3 Normalized criteria weights obtained using the swing and pairwise methods

	Economic					Environmental			Social		Technological					
	C	PR	VR	T	CS	PL	HM	RU	EM	SWEF		TRL	LTE	OASSC		
Swing Weights	16.5%	8.6%	6.3%	5.0%	3.2%	5.7%	7.3%	5.1%	1.2%	1.8%		14.0%	9.8%	13.8%	1.6%	3.0%
Pairwise Comparison Weights	17.6%	7.4%	6.2%	5.3%	2.1%	5.5%	8.6%	5.2%	1.0%	2.0%		13.9%	10.4%	11.2%	1.1%	2.5%

Implementing MCDM ranking methods

The ranking methods require multiple input parameters for the criteria. On one hand, for ELECTRE III, the criteria, their optimization, the indifference, preference and veto thresholds are in Tableau 6.5.

Tableau 6.4 Description of different scenarios' parameters

Scenario	Weighting	Ranking	Sustainable Criteria
1	Swing	ELECTRE III	Yes
2	Swing	ELECTRE III	No
3	Swing	PROMETHEE	Yes
4	Swing	PROMETHEE	No
5	Pairwise Comparison	ELECTRE III	Yes
6	Pairwise Comparison	ELECTRE III	No
7	Pairwise Comparison	PROMETHEE	Yes
8	Pairwise Comparison	PROMETHEE	No

On the other hand, PROMETHEE requires a different format for criteria thresholds as each criterion has its own preference function which requires specific preference parameters. Appendix B describes the criteria data input for the case study.

Tableau 6.5 Criteria thresholds for ELECTRE III

	Economic					Environmental			Social		Technological							
	C	PR	VR	T	CS	PL	HM	RU	EM	SWEF		TR	LL	TE	O	A	SS	SC
Optimization	Min	Max	Max	Min	Max	Min	Min	Min	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max
Indifference threshold q	2000	1	1	2	10	0	1	2	1	2	0	1	3	0	5			
Preference threshold p	3500	2	2	6	30	1	2	3	2	4	1	3	6	1	20			
Veto threshold v	10,000	4	4	14	60	3	10	7	4	5	3	5	24	2	30			

6.5 Results and discussion

6.5.1 MCDM results

To evaluate the impact of the suggested framework, the results from the eight scenarios are described in Tableau 6.6.

While considering sustainability criteria, it is important to note that the first three alternatives were not sensitive to the weighting method as scenarios 1 and 3 results were almost the same in the first place. The same was observed for scenarios 5 and 7. Decision making using only cost, procurement, time, functionality, technology readiness level, open architecture and software compatibility was sensitive to the weighting method. It is explained by the fact that criteria weights change their importance when the mindset of the decision maker changes. When sustainability criteria were deleted, the cost and functionality criteria became the most important with large weights. It is not the case when considering sustainable criteria such hazardous material or pollution. In that case, there is no compromise, and respecting legislation is a binary decision—one either respects it or not. That is why cost and functionality lose some of their weights.

Tableau 6.6 Ranking results for all scenarios

Rank	Scenari o 1	Scenari o 2	Scenari o 3	Scenari o 4	Scenari o 5	Scenari o 6	Scenari o 7	Scenari o 8
1	A3	A7	A3	A7	A3	A7	A3	A7
2	A9	A2	A9	A6	A9	A4	A9	A3
3	A1	A9	A1	A1	A1	A9	A1	A1
4	A2, A8	A6	A8	A5	A2	A6	A6	A5
5	---	A1	A2	A8	A8	A1	A8	A8
6	A6	A3	A6	A3	A6	A2	A2	A6
7	A7	A4	A4	A9	A7	A3	A4	A9
8	A5	A5, A8	A7	A2	A5	A5	A7	A2
9	A4		A5	A4	A4	A8	A5	A4

It is clear that A3 dominates the first place in the sustainable ranking compared to A7 if sustainability is not considered. Comparing these two alternatives shows that the algorithm converged to a cheaper solution with acceptable technological characteristics compared to the best alternatives when the sustainable framework was used. In that case, alternatives respecting the environmental constraints with good technological performance were ranked first as the economical aspect is no longer a priority.

6.5.2 Sensitivity analysis

Sensitivity analysis is an indispensable concept in the effective use of the quantitative decision model, and the purpose of this analysis is to assess the stability of an optimal solution under changes in parameters, the impact of unmanageability of some parameters and the need for accurate estimation of values of parameters. However, research on sensitivity analysis in multicriteria decision support is limited. The decision support process does not stop when one has an answer. A good decision support process must, generally, study the sensitivity of the parameters that led us to this response and the robustness of the response itself. After obtaining the final ranking of both methods, a sensitivity analysis is essential to measure the solution's robustness. The solution sensitivity to both weights and thresholds can be studied. In our case, sensitivity to thresholds is not studied as these parameters are mostly determined by legal documents and standards. Where ELECTRE III sensitivity analysis was done manually by increasing and decreasing each weight by 10% and checking if the solution changed, PROMETHEE sensitivity analysis was performed using Visual PROMETHEE software. For all scenarios, solutions were stable for the first three alternatives. As an example, Tableau 6.7 describes the stability intervals for scenario 7.

The solution has multiple industrial contributions such as respecting international standards and legal obligations regarding environmental restrictions. It also defines a clear process ensuring sustainability and competitiveness with an easy preference modeling in a highly subjective decision-making environment. It allows the company to decrease pollution levels

and hazardous materials usage while increasing customer satisfaction and technological performance.

Tableau 6.7 PROMETHEE stability intervals for scenario 3

Criteria	Weight	Min	Max
C	17.6%	12.26%	23.26%
PR	7.4%	0%	15.33%
VR	6.2%	0.4%	31.48%
T	5%	0%	12.59%
CS	2.1%	0%	19.76%
PL	5.5%	0.43%	18.27%
HM	8.6%	0%	25.78%
RU	5.2%	0.0%	39.9%
EM	1%	0.0%	15.65%
SWE	2%	0.0%	30.38%
F	13.9%	0.3%	23.33%
TRL	10.4%	9.4%	48.44%
LTE	11.2%	6.65%	16.77%
OAS	1.1%	0%	100%
SC	2.5%	0%	20.29%

6.6 Conclusion and future work

This paper describes a sustainable multicriteria decision framework to manage obsolescence. Once alternatives were determined, MCDM tools were employed to select the best obsolescence resolution strategy according to a set of sustainable criteria. This helps companies obtain the best trade-off between economic, social, environmental and technological constraints.

Since MCDM tools were employed, it was necessary to determine a set of criteria, their weights and the available alternatives. Prior to this work, quantitative MCDM tools were used but limited in most cases as they support neither qualitative data nor uncertainty. MCDM tools' effectiveness and accuracy depend strongly on the problem and the decision maker. They require strong preference modeling. The case study demonstrated that in all scenarios, a ranking of the solutions was obtained, but it widely depended on the input parameters. It is acceptable to select the least sustainable option, but it may impact the company's engagement and ethics and break legal rules related to the environmental aspect. Incorporating sustainability in the decision making is then important in a complex and constrained decision environment.

The comparison between the weighting methods demonstrated that pairwise is much more appreciated by the decision makers due to its simplicity and its comparison principle. Between ELECTRE III and PROMETHEE II, preference modeling was easier with the second method using preference functions. To support MCDM uncertainty, it is recommended to use both methods as they deal differently with preferences and there is no guarantee that one will always work better than the other. In addition, the sustainability of the decision is also important and is represented by its sensitivity and robustness. The sensitivity to the criteria weights was studied, but sensitivity thresholds could be done for further analysis. As noted previously, the success of the suggested framework is based on data quality and the company engagement in reducing its environmental impact to achieve sustainable global policy.

The results of this study indicate that MCDM ranking methods are effective in ORS selection via the proposed sustainable framework. This was validated with the comparison of the decisions before and after applying the sustainable criteria set. The research findings suggest that integrating sustainability to an unsustainable problem that combines economic, environmental, social and technological factors would provide useful insights to support decision making and improve obsolescence resolution strategies for a sustainable and green system.

Although the capability of the suggested framework and the MCDM ranking methods to handle sustainable decisions in the ORS selection process was approved in the current study, the application was limited to the reactive management level. The framework would be used for future research at the proactive management level to examine the impact of the strategies in the product design, for example. Alternatively, the effectiveness of the proposed MCDM tools could be compared to other decision models such as multi-objective optimization. In the case of the proactive management, dynamic decision making would be more advantageous considering the volatile and uncertain evolution of both technological and environmental parameters. However, more studies should be conducted to assess the environmental impact caused by obsolescence and to work on it proactively, reactively and strategically.

CHAPITRE 7

DISCUSSION

Ce chapitre présente une synthèse des développements scientifiques des méthodes et outils réalisés tout au long de la thèse pour la gestion de l'obsolescence, en réponse aux objectifs de doctorat mentionnés à l'introduction. À travers ce chapitre, les avantages et limitations de la recherche seront exposés.

7.1 Justification de la problématique de recherche

La problématique de la recherche étudiée dans cette thèse répond au manque de modèles et méthodes efficaces pour la gestion durable de l'obsolescence. En effet, le concept d'obsolescence a été soulevé à l'origine pour répondre à un besoin spécifique d'une entreprise aéronautique partenaire. La littérature a confirmé par la suite que ce problème existe dans plusieurs secteurs, tels que l'automobile, l'électronique, etc., et qu'il n'est pas limité au secteur aéronautique. Néanmoins, la littérature a surtout mis l'accent sur l'obsolescence dans le secteur militaire, car ce problème émerge fréquemment dans des systèmes qui ont un cycle de vie beaucoup plus long que leurs composants. Cet écart rend ces industries très fragiles relativement au problème d'obsolescence et entraîne des coûts importants.

Ce qui a élargi l'écart du cycle de vie entre les systèmes et leurs composants est l'introduction de nouvelles technologies qui ont révolutionné l'industrie électronique. Cette évolution a créé des milliers de nouveaux composants avec un cycle de vie très court. De ce fait, l'obsolescence peut par conséquent se produire lorsque la technologie n'est plus offerte sur le marché. L'obsolescence est un problème majeur pour plusieurs entreprises, motivé ainsi par la littérature, et qui nécessite d'être résolu. Actuellement, plusieurs entreprises ne disposent pas de méthodes efficaces pour gérer l'obsolescence; par conséquent, le développement des modèles et outils est nécessaire, justifiant ainsi ce projet

7.2 Synthèse des développements scientifiques.

Cette recherche s'est intéressée aux développements scientifiques de la gestion durable de l'obsolescence par des études exploratoires, mais aussi par le développement et la validation d'outils et de modèles. Ces contributions sont présentées comme des articles scientifiques dans les chapitres 3 à 6, les articles de conférences sont en annexe. Pour répondre aux objectifs de doctorat, la recherche s'est divisée en trois volets : exploration et analyse; mesure et résolution et finalement le volet décision. Le volet « exploration » porte sur la définition de l'obsolescence technologique, son impact sur les performances des organisations, ainsi que son rôle dans l'augmentation des déchets EEE. L'originalité de ces travaux est la mise en évidence de ce rôle important à travers des études et des statistiques collectées de plusieurs sources comme décrit dans le chapitre de la méthodologie ainsi que l'introduction de son impact sur les performances des organisations par une étude de cas dans l'industrie aéronautique. Le volet mesure et résolution vient tout juste une fois le problème est cerné et les parties impactées identifiées pour proposer des mesures de gestion afin d'atténuer l'impact. Pour cela un modèle de mesure de maturité des niveaux de gestion a été développé et utilisé en interne comme en externe pour bien choisir ses fournisseurs et ses sous-traitants. Plus le niveau de maturité est élevé, mieux c'est. Pour supporter ces extrants, un exemple de résolution d'un cas d'obsolescence de processus est présenté. La solution était laborieuse et coûteuse et demandait des connaissances spécifiques à la problématique de regroupement des produits en familles de produits. Cela prouve que chaque cas d'obsolescence est unique et demande des connaissances approfondies du domaine concerné. La complexité et l'impact de l'obsolescence : environnemental ou opérationnel nécessite une analyse vigoureuse pour supporter les décisions de choix ou sélection des solutions. Pour supporter cela, un modèle de décision multicritères est développé, permettant ainsi une résolution durable ou l'impact de la décision est évalué en amont considérant des critères, en plus ceux du coût, liées à l'environnement, aux opérations vus dans le 1^{er} volet exploratoire, mais aussi des critères stratégiques tels que la maturité des systèmes de gestion d'obsolescence des fournisseurs. La correspondance entre les volets, les chapitres et les questions de recherche est décrite dans la Figure 0.3.

7.2.1 1^{er} volet : exploration et analyse d'impact de l'obsolescence

Article de revue : L'obsolescence technologique des composants et équipements électroniques : enjeux et défis

Le risque d'obsolescence est étroitement lié aux préoccupations environnementales, telles que les déchets électroniques et l'utilisation de matériaux rares, ainsi qu'à de multiples autres aspects, tels que les questions économiques et financières. La durabilité n'est pas considérée comme une tâche facile, car elle implique des niveaux élevés de gestion d'entreprise, de production et de consommation par la société. En ce sens, la pression écologique, sociale et économique s'accroît dans les entreprises, car la pollution qu'elle génère a atteint des niveaux jamais notés auparavant.

Lorsqu'on l'associe au phénomène de l'obsolescence, la fabrication de nouveaux équipements électriques et électroniques grand public a des répercussions sur l'environnement et le climat, comme les gaz à effet de serre et les déchets. Il est évident que l'augmentation de la durée de vie des produits est essentielle pour promouvoir une consommation et une production durables et écologiques. Il existe plusieurs options pour relever ce défi, à savoir des modèles de l'économie circulaire, l'éco-conception, ou encore les mesures et lois limitants les pratiques non écologiques. Ces options doivent désormais faire partie du processus de prise de décision pour garantir un usage conscient et durable de la technologie mise à notre disposition.

Dans une première étude introductive, l'obsolescence technologique a été élargie aux consommables et une première relation avec les déchets électroniques et électriques a été prouvée. Au-delà de la facette économique du sujet, il a été conclu que l'obsolescence joue un rôle crucial dans l'accumulation de ces déchets et qu'une gestion plus consciente pourrait diminuer ou limiter sa part.

Cette étude a permis de mettre le point sur la participation de l'obsolescence technologique dans les déchets EEE et son impact environnemental ainsi que l'exploitation des ressources.

Article de conférence: The impact of parts obsolescence on organization's performances: a case study in the aeronautic industry

Cette étude exploratoire fournit des pistes et des orientations précieuses pour améliorer les systèmes actuels de gestion de l'obsolescence en prenant en considération les performances des organisations. La quantification de l'impact du risque sur les performances semble dépendre de deux facteurs : la gestion du processus d'obsolescence et les politiques de l'entreprise. En outre, ce travail empirique met en évidence l'évolution considérable du risque d'obsolescence, qui constitue une préoccupation majeure dans toutes les industries technologiques.

Malgré les efforts déployés dans la recherche scientifique en matière de gestion de l'obsolescence, les systèmes de gestion actuels restent principalement « réactifs ». Dans la pratique, les décideurs ne sont pas suffisamment conscients de la valeur d'une gestion proactive et stratégique. La tendance actuelle à l'accélération du développement technologique est alarmante, de sorte qu'un processus de gestion robuste est nécessaire pour obtenir de meilleures performances, une plus grande résilience au risque d'obsolescence et une industrie plus verte. Celle ne constitue pas une base pour une généralisation scientifique, c'est pourquoi des travaux supplémentaires se concentreront sur ce point et établiront une théorie plus générale. Il ne fait aucun doute que l'obsolescence a un impact sur les performances des organisations et qu'il convient de lui accorder une plus grande importance, car le risque augmente en gravité et en fréquence. L'étude de la diffusion de la perturbation dans l'organisation et l'intégration des performances de l'organisation dans les outils de prise de décision sont une priorité pour mieux gérer le risque et constituent l'objectif du grand projet de recherche visant à rendre les entreprises plus performantes, robustes, résilientes et durables.

Comme première étude, les résultats nous ont permis de prouver l'impact environnemental et social. Cela a ouvert la voie à des travaux de recherche plus approfondis.

Validation

Ce 1^{er} volet exploratoire a été validé par les experts chez notre partenaire industriel. Les extrants résultent de l'analyse de la littérature et du cas d'étude.

Généralisation

L'étude est exploratoire introductive. Elle a mis le point sur l'impact de l'obsolescence sur les organisations et sa participation dans les déchets EEE.

Limitations

L'étude demeure exploratoire et limitée au domaine de d'étude de l'obsolescence technologique qui est aéronautique. La validation par les experts représente une limitation dans ce travail. Leur nombre limité, la difficulté d'accès à l'information et sa sensibilité doivent être revus dans un contexte plus général et structuré avec un appui scientifique solide.

Recherches futures

Des perspectives de généralisation des extrants est souhaitée ainsi que la caractérisation de son impact. Il s'y ajoute également, une étude d'évaluation d'impact de plus grande envergure pour atteindre un plus grand nombre de personnes et domaines impactés par l'obsolescence.

7.2.2 2^{ème} volet : mesure de la maturité et résolution d'un cas d'obsolescence de processus

Article de conférence: Evaluation and validation of a maturity model in obsolescence management for increased performances

Cette étude a permis de développer un modèle de maturité de base pour la gestion de l'obsolescence qui couvre tous les domaines de processus pouvant être affectés par l'obsolescence ou impliqués dans sa gestion, les objectifs génériques, les objectifs spécifiques, les activités et les tâches. Le modèle a été testé et évalué dans plusieurs secteurs industriels. L'outil décrit dans cet article a été principalement développé pour permettre aux gestionnaires de mieux gérer le risque d'obsolescence. Il présente une base pour un modèle de maturité

standard et général en matière de gestion de l'obsolescence, permettant la comparaison entre les organisations, mais aussi l'amélioration continue et la durabilité. Cet outil aidera les entreprises à mieux choisir leurs fournisseurs avant ou après le passage des contrats traditionnels, car il s'applique aussi bien aux fournisseurs qu'aux clients. En résumé, les avantages pour les organisations d'utiliser un outil de mesure de la maturité dans la gestion de l'obsolescence sont les suivants :

- Mesurer le niveau de maturité actuel
- Comparer les niveaux de maturité avec ceux des concurrents
- Mesurer le niveau de maturité des fournisseurs
- Aider les fournisseurs et les clients à améliorer leur niveau de maturité
- Atteindre des objectifs génériques et spécifiques en ce qui concerne les entreprises, les normes IEC62402 et ISO9001 pour une amélioration continue

Bien que le modèle de maturité présenté dans cet article couvre presque tous les aspects de la gestion de l'obsolescence classique, il s'agit encore d'une tentative initiale visant à atteindre la qualité requise pour une utilisation commerciale. De nombreuses améliorations sont nécessaires. Il faut tout d'abord élargir le champ d'application afin de l'adapter à tous les types d'entreprises. Ensuite, le processus de validation est limité et nécessite l'intervention d'experts internationaux en obsolescence pour l'évaluation et l'amélioration de l'outil. L'approche de représentation continue peut également être abordée afin de compléter la représentation par étapes et permettre aux gestionnaires de mesurer les capacités des entreprises en matière de gestion de l'obsolescence pour toutes les industries technologiques et pas seulement pour les utilisations militaires comme TOMCAT. Dans une approche écologique, il est primordial d'y inclure les quatre dimensions de développement durable. Ainsi, en interne comme dans ses choix de partenaires, une entreprise pourra encourager l'évolution écologique.

Article de revue: A two phase part family formation model to optimize resource: a case study in the electronics industry

Cette étude a présenté la résolution d'un cas d'obsolescence de processus. L'exercice a été compliqué. Le modèle développé est basé sur du calcul mathématique solide ainsi que l'algorithme de regroupement.

La solution proposée a été validée par l'entreprise partenaire, mais n'empêche une obsolescence future d'où le besoin de garder un œil sur l'évolution des opérations, mais aussi de faire évoluer le modèle vers un modèle dynamique qui pourra lutter contre ce type d'obsolescence.

Validations

Le modèle de mesure de maturité a été validé par l'application chez notre partenaire industriel Bell Helicopter. Quant à l'obsolescence de processus, la solution a été implémenté chez IBM.

Généralisations

Le modèle de maturité développé est applicable à tout type d'industrie malgré qu'il soit développé dans un milieu restreint. Reposant sur un modèle largement connu dans le milieu industriel, l'application de cette version de CMMI doit être relativement facile et adaptable au type de produit et aux choix de gestion de l'obsolescence soit en interne ou en externe vis-à-vis la législation ou les fournisseurs.

Limitations

Le modèle de maturité reste limité en couverture des critères durables d'évaluation. Leur exclusion est dû à l'ordre chronologique des travaux et à l'immaturité écologique en gestion de l'obsolescence plus généralement.

Recherches futures

Dans le futur, l'amélioration du modèle de maturité actuel doit prendre en compte les autres types d'obsolescence (connaissances, technicité) mais aussi le paramètre écologique dans une vision de développement durable.

7.2.3 3^{ème} volet : prise de décisions durables en gestion d'obsolescence

Article de revue : A sustainable multicriteria decision framework for obsolescence resolution strategy selection

Ce travail décrit un cadre décisionnel multicritères durable pour gérer l'obsolescence. Une fois les alternatives déterminées, des outils MCDM ont été utilisés pour sélectionner la meilleure stratégie de résolution de l'obsolescence selon un ensemble de critères durables. Cela aide les entreprises à obtenir le meilleur compromis entre les contraintes économiques, sociales, environnementales et technologiques.

Étant donné que des outils MCDM ont été utilisés, il a été nécessaire de déterminer un ensemble de critères, leur pondération et les alternatives disponibles. Avant ce travail, des outils MCDM quantitatifs étaient utilisés, mais ils étaient limités dans la plupart des cas, car ils ne prennent en charge ni les données qualitatives ni l'incertitude. L'efficacité et la précision des outils MCDM dépendent fortement du problème et du décideur. Ils nécessitent une modélisation solide des préférences. L'étude de cas a démontré que dans tous les scénarios, un classement des solutions a été obtenu, mais qu'il dépendait largement des paramètres d'entrée. Il est acceptable de sélectionner l'option la moins durable, mais cela peut avoir un impact sur l'engagement et l'éthique de l'entreprise et violer les règles juridiques liées à l'aspect environnemental. Il est donc important d'intégrer la durabilité dans la prise de décision dans un environnement complexe et rigide.

La comparaison entre les méthodes de pondération a démontré que la méthode par paires est beaucoup plus appréciée par les décideurs en raison de sa simplicité et de son principe de comparaison. Entre ELECTRE III et PROMETHEE II, la modélisation des préférences était plus facile avec la deuxième méthode utilisant des fonctions de préférence. Pour prendre en compte l'incertitude dans la MCDM, il est recommandé d'utiliser les deux méthodes, car elles traitent différemment les préférences et rien ne garantit que l'une fonctionnera toujours mieux que l'autre. En outre, la durabilité de la décision est également importante et est représentée

par sa sensibilité et sa robustesse. La sensibilité aux pondérations des critères a été étudiée, mais des seuils de sensibilité pourraient être établis pour une analyse plus approfondie. Comme indiqué précédemment, le succès du cadre proposé repose sur la qualité des données et l'engagement de l'entreprise à réduire son impact environnemental afin de mettre en œuvre une politique mondiale durable.

Les résultats de cette étude indiquent que les méthodes de classement MCDM sont efficaces dans la sélection des ORS via le cadre durable proposé. Cela a été validé par la comparaison des décisions prises avant et après l'application de l'ensemble de critères durables. Les résultats de la recherche suggèrent que l'intégration de la durabilité à un problème non durable combinant des facteurs économiques, environnementaux, sociaux et technologiques fournirait des informations utiles pour soutenir la prise de décision et améliorer les stratégies de résolution de l'obsolescence pour un système durable et écologique.

Bien que la capacité du cadre proposé et des méthodes de classement MCDM à traiter les décisions durables dans le processus de sélection des ORS ait été approuvée dans la présente étude, l'application s'est limitée au niveau de la gestion réactive. Le cadre serait utilisé pour de futures recherches au niveau de la gestion proactive afin d'examiner l'impact des stratégies dans la conception des produits, par exemple. Par ailleurs, l'efficacité des outils MCDM proposés pourrait être comparée à d'autres modèles décisionnels, tels que l'optimisation multi-objectifs. Dans le cas de la gestion proactive, la prise de décision dynamique serait plus avantageuse compte tenu de l'évolution volatile et incertaine des paramètres technologiques et environnementaux. Cependant, d'autres études devraient être menées pour évaluer l'impact environnemental causé par l'obsolescence et y remédier de manière proactive, réactive et stratégique.

Validations

Pour la validation du modèle de prise de décision multicritère en gestion de l'obsolescence celui-là a été appliqué et validé chez Bell Helicopter.

Généralisations

La méthode d'aide à la décision multicritère correspond à la nature de la problématique considérant des critères quantitatifs et qualitatifs. Cette solution est facilement transférable et applicable dans n'importe quel cas d'obsolescence technologique au-delà de l'aéronautique et en présence de suffisamment de données permettant une prise de décision rigoureuse.

Limitations

Le modèle MCDM proposé est limité en termes de quantification des critères et leurs évaluations pour chaque alternative mais aussi sur certains aspects liés à la nature multicritère. Une analyse concernant l'intervention des experts dans la prise de décision serait pertinente pour la robustesse du modèle. Une possible corrélation entre les critères (pollution et matières dangereuses par exemple) doit être considérée et analysée pour la validité du modèle. Les poids des critères, également très impactant, nécessitera une étude de sensibilité afin de ne pas dépasser les seuils de robustesse des classements obtenus.

Recherches futures

Développer un métamodèle durable et dynamique pour suivre la volatilité du marché et de l'écosystème technologique.

L'ensemble des travaux effectués dans le cadre de cette thèse ont bien répondu à la problématique initiale et ont participé à la résolution des problèmes industriels, mais l'amélioration des modèles est nécessaire dans un environnement dynamique. Une tentative a été initiée dans une ébauche de recherche décrite dans l'Annexe III.

7.3 Conclusion

Partant du besoin industriel, et comme discuté auparavant, l'entreprise partenaire avait des problèmes d'obsolescence. Des communications et des entretiens ont révélé la faiblesse et le manque de stratégies efficaces pour les gérer l'obsolescence. En revanche, ces entretiens ont favorisé la compréhension, leur permettant de positionner leurs besoins et leurs attentes. Les

parties prenantes de ce projet ont exprimé leur besoin d'améliorer leur gestion de l'obsolescence. Cependant, la portée et la forme de ce modèle n'étaient pas claires de leur côté. Pour déterminer la méthode adéquate, une revue critique de la littérature est amenée à cet égard, cette dernière a révélé de nombreuses méthodes de gestion de risque et de cycle de vie. Dans la littérature, la majorité des travaux sont basés sur la gestion purement économique en optimisant le TCO (*Total Cost of Ownership*) ou encore le prolongement de la durée de vie par un LTB ou un redesign. Néanmoins, le risque de l'obsolescence n'est pas limité au facteur économique ni à la longévité du système. Plusieurs autres performances sont affectées et impactent par conséquent les systèmes complexes ainsi que les organisations. De ce fait, l'analyse de l'impact était primordiale pour débiter l'amélioration. Ensuite, pour maîtriser la situation, la maturité de l'organisation en matière de gestion d'obsolescence ainsi que de ses fournisseurs a été mise à l'épreuve. Un cas concret d'obsolescence de processus a été résolu par des techniques de l'apprentissage machine. Cela est justifié à partir des limites dans les approches existantes dans la littérature. Finalement, considérant l'étendue de risque et son impact, la composante de la durabilité de la décision présentait une avancée. Celle-là privilégierait le LCC (Life Cycle Cost) au TCO. Ces deux coûts offrent des perspectives différentes, le TCO est la vision acheteur alors que le LCC est la vision système dans un objectif d'optimisation et de durabilité. Le LCC est également la version économique de l'analyse de cycle de vie qui sert à mesurer les impacts environnementaux permettant ainsi d'aligner les décisions écologiques aux décisions économiques. Ce type de décisions se basait sur des critères quantitatifs et qualitatifs justifiant l'utilisation des outils d'aide à la décision multicritère.

L'entreprise partenaire gère l'obsolescence de façon réactive. À la vue de ce manque, celle-là a cherché à implanter un outil efficace de gestion qui va l'aider à réduire les coûts et minimiser son impact potentiel sur la chaîne de production. Pour évaluer le risque et pour bien cibler leurs besoins et les livrables requis, les solutions ont été développées au sein de l'entreprise, une étude de cas a été à chaque fois élaborée pour valider les travaux d'un point de vue industriel. L'acceptation des articles pour publication scientifique et revue par les pairs représente une validation scientifique.

L'ensemble de ses travaux a répondu à un besoin industriel. Il a aussi contribué scientifiquement et a ouvert des perspectives d'introduire l'obsolescence comme paramètre nouveau dans la prise de décision, mais aussi dans la gestion et l'optimisation de la chaîne logistique et l'économie circulaire.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette dissertation discute des méthodes, outils et connaissances développés pour la gestion de l'obsolescence des composants électroniques sur plusieurs dimensions. Les méthodes proposées sont basées principalement sur l'analyse du problème, l'exploration de l'étendue et l'amélioration de l'existant. Les solutions présentées dans cette thèse ont permis de répondre à plusieurs questions et de proposer des méthodes innovantes relatives à la problématique de recherche et afin de satisfaire les objectifs du doctorat.

La thèse a introduit trois approches pour la gestion de l'obsolescence, à savoir son impact caché, la maturité de système de gestion et la prise de décision durable. Pour l'analyse d'impact, l'étude s'est basée principalement sur une étude de cas qui doit être généralisé. La mesure de maturité des systèmes a été inspirée des modèles CMMI. La résolution et la prise de décision se sont basées sur l'apprentissage machine et les techniques MCDM (chapitres 3 et 4). En ce qui concerne la chaîne logistique et l'économie circulaire, une première étude quantifiant la part de l'obsolescence dans les déchets EEE servira de justification pour la prendre en paramètre additionnel dans la modélisation et l'optimisation des chaînes logistiques.

Cette thèse a permis le développement d'un ensemble de critères durables dans la résolution de l'obsolescence basée sur des faits réels et du besoin industriel. D'un point de vue pratique, ces critères amélioreront considérablement la gestion de l'obsolescence en termes de durabilité, par la prise de décision de la stratégie de mitigation adéquate.

Retombées scientifiques

Cette thèse a permis de valoriser la culture scientifique sous forme de publications d'articles dans des revues scientifiques, dont trois journaux et trois conférences (Tableau 0.1). Ces travaux de recherche ont contribué à la connaissance de l'obsolescence, ses facteurs et ses impacts à partir d'une revue exhaustive de la littérature qui a mis l'accent sur les lacunes dans

les travaux scientifiques existants. Les méthodes développées dans cette thèse permettent un renforcement de la recherche scientifique autour de l'obsolescence des composants électroniques par l'appui de trois principales contributions. La première contribution concerne l'introduction de l'apprentissage machine et la MCDA pour la résolution d'un cas d'obsolescence de processus en proposant une approche innovante de combinaison entre l'algorithme de regroupement et la décision à l'aide d'ELECTRE III et PROMTHEE dans l'article présenté dans le chapitre 5. La deuxième contribution scientifique, quant à elle, est justifiée par l'introduction d'une méthode durable pour la prise de décision en cas d'obsolescence basée sur l'intégration des critères durables, la considération de toutes les alternatives et les techniques MCDM (papier présenté dans le chapitre 6). La différence entre ce travail et d'autres travaux antérieurs est la dimension de durabilité à un niveau proactif et stratégique. Finalement, la troisième contribution repose sur l'exploration de l'impact environnemental de l'obsolescence pour optimiser la chaîne logistique.

Retombées industrielles

Les travaux de recherche réalisés dans le cadre de cette thèse, et les résultats encourageants permettent une meilleure gestion de l'obsolescence et peuvent offrir plus de durabilité dans leurs décisions. Cela entraîne un changement de perception chez les entreprises pour faire face à l'obsolescence et les aide à évaluer le risque dans le marché des composants électroniques afin de suivre la cadence de l'évolution technologique et prendre les bonnes décisions.

Le projet contribue à mettre en évidence des perspectives pour l'avenir des industries dans plusieurs secteurs, notamment l'électronique et l'aéronautique, et à mieux piloter ce genre de projet d'une façon stratégique. Les solutions développées offrent à l'entreprise une démarche améliorée pour sa gestion de l'obsolescence.

Les trois volets de la thèse représentent une approche intégrée complète en gestion durable de l'obsolescence technologique: explorer, mesurer et décider. L'étude exploratoire de l'impact sur les performances organisationnelles a permis de définir les artéfacts à mesurer dans le

modèle de maturité en premier temps. Ce dernier permet d'évaluer le niveau de gestion de l'obsolescence sur une échelle de 1 à 5 aux niveaux réactif, proactif et stratégique. Viendra ensuite la sélection des stratégies de résolution qui s'appuie à la fois sur l'impact pour en définir les critères d'évaluation des solutions en considérant le niveau de maturité du système de gestion et son mode. Dans une perspective de développement durable, le modèle de maturité devra inclure la composante écologique, exploré dans le cadre de cette thèse, pour fermer la boucle.

Plusieurs tentatives de caractérisation de l'impact de l'obsolescence technologique ont été repérées dans la littérature comme (Mokraoui, Costa-Afonso, Besbes, Zolghadri, & Baron, 2025) qui a analysé les alternatives ou les solutions possibles d'un point de vue environnemental dans le but de bâtir une méthode d'évaluation adéquate. Dans une recherche future, l'impact environnemental sera modélisé et intégré dans un outil d'aide à la décision multicritère.

Bien que la majorité des compagnies ont développé des outils internes pour contourner le risque de l'obsolescence, des outils de gestion et d'aide à la gestion de l'obsolescence technologique ont connu un grand essor ces dernières années. De nouvelles bases de données promettant un suivi des obsolescences et des changements de produits ont vu le jour comme Z2data, d'anciennes bases se voient s'améliorer en introduisant des indicateurs liés aux risques de la chaîne d'approvisionnement d'un composant, la rareté des matériaux, la qualité des fournisseurs... d'autres outils sont plus liés à la gestion de cycle de vie comme Amsys. Les tentatives continuent à essayer de répondre à un besoin industriel accru pour la gestion de l'obsolescence (Besbes, Leclaire, Souifi, Mrabah, & Zolghadri, 2025)

ANNEXE I

THE IMPACT OF PARTS OBSOLESCENCE ON ORGANIZATION'S PERFORMANCES: A CASE STUDY IN THE AERONAUTIC INDUSTRY

Imen Zaabar ^{a*}, Yvan Beauregard ^a and Marc Paquet ^b

^a École de Technologie Supérieure, Département de génie mécanique, 1100 Rue Notre Dame O, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

^b École de Technologie Supérieure, Département de génie des systèmes, 1100 Rue Notre Dame O, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

Article présenté à la conférence MOSIM, Août 2016

Abstract

The research investigates the impact of the obsolescence risk on the organization's performances via an empirical research in the aeronautic industry. The study focuses on three main components of the risk management: the ability to forecast, the ability to recover and the ability to manage at a strategic level. It is based on a case study for data collection and analysis. The results provide new insights about 1) the level of awareness of companies about the problem of obsolescence, 2) its impact on the organization's performances and 3) the detection of weakness and strength of the actual obsolescence management systems in the study sample. The scientific contribution of this paper is to explore the high and aggressive risk of obsolescence from an organization perspective, identify its impact and find solution for higher performance, more resilience to obsolescence risk and a greener industry.

Keywords: Obsolescence, performances, risk management, sustainability, environment.

I.1 Introduction

Parts Obsolescence has become a big issue for long-lifecycle products. It forbids the maintenance of systems (Rojo et al., 2012b), affects its security and its readiness (Yali et al,

2012) but also the production line (Hitt et al, 1998). For that reason, obsolescence management is now a crucial part of the system maintenance and support activities in long-lifecycle products sectors like defence, aerospace and nuclear. Those products need to be supported for a very important period of time compared to their subsystems and their components. The most important factor generating obsolescence cases is the rapid technological development (Bartels et al., 2012). It is considered as the implacable enemy that modern products developers face (Gravier & Swartz, 2009).

Obsolescence management was always studied from a system perspective (to maintain its performance, its functionalities, security, qualification and certification) but never from an organization perspective, to our knowledge. In this paper, the scientific contribution is to explore the risk from a new perspective by asking two main questions, as a first work: how does obsolescence risk impact organization performances? And do obsolescence management levels reduce the obsolescence impact on organization's performances? To achieve the research goals, a case study was processed within an industry suffering from obsolescence problems to know about their obsolescence management system and introduce the impact of parts obsolescence on the organization performances.

Actually, the risk of obsolescence is a modern one which is becoming more and more frequent and violent. It concerns almost all the technological industries: aircrafts, computers, ... All technological products are affected even those with high production and short life cycle. Long life cycle systems are affected twice, the obsolescence caused by the aging and the obsolescence when they are in production due to the rapid evolution of technology. The contribution of this work is to put the first stone for a new research field which is the technological obsolescence for long life cycle products starting from their conception to their recycle process. The problem is more and more aggressive, expanded and need solutions to prevent the systems and the organizations from the brutal perturbation when risk occurs. This paper is divided into 4 sections, the first was the introduction. The 2nd section is a brief literature review about the obsolescence risk and its management. As the work is new, no previous works were done in the same research direction so the literature review covers in

general the problem and try to identify the gap to clarify the work research direction and its goals. The part 3 presents the theoretical framework and the methodology of the study to respond to research question. The part 4 presents the preliminary results and its analysis. The conclusion includes research summary and proposes some future research works.

I.2 Literature review

I.2.1 The obsolescence risk

The definition of obsolescence was clearly defined in the literature. It is known as the loss of one or more elements from the manufacturer, the suppliers or even the raw materials (Tomczykowski, 2001). to be more realistic on defining obsolescence (Bartels et al., 2012), it can be defined when a material or a technology is not available when is requested for the production or the support of a system. The part, material or technological, does no longer exist in stock or from the OCM.

The systems and components obsolescence has several reasons: the technological development (Feldman & Sandborn, 2008), the disappearance from the market of the original component manufacturer (OCM) for different reasons, the disruption of production by the Original Component Manufacturer (OCM) or the Original Equipment Manufacturer (OEM), the chemical or physical change due to aging of stored parts can destroy partially or totally parts up to make them unusable (Bartels et al., 2012).

The issues of obsolescence overstep aging sustainment dominated systems, considered as the most vulnerable systems to obsolescence. It is expanding in range and cruelty. Facing a rapid rhythm of technological innovation that moves faster than system life cycles is a big challenge for an increasing number of industries. Several examples overflow in industries as diverse as aviation, media, electronics manufacturing, semiconductor manufacturing, and air conditioning engineering (Gravier & Swartz, 2009). Technological obsolescence is no longer long-life systems concern only but all technological products since the step of predesign.

I.2.2 Obsolescence management

The management of part obsolescence includes: part lifecycle characterization, part obsolescence forecasting, product deletion and lifecycle planning (Yuelin & Willems, 2014) but also the design for obsolescence (Herald & Ramirez-Marquez, 2012). The management process includes, ideally, three management levels: the proactive management, the reactive management and the strategic management (Bartels et al., 2012; Sandborn, 2013).

The different mitigation strategies were described in (Livingston, 2000) so if obsolescence occurs the decision maker can choose between several solutions: the lifetime buy, the bridge buy, the part substitution, the alternate supplier, the after-market solution, the line redesign or the design refresh or the emulation. The choice will depend on various parameters such as the total cost (Yuelin & Willems, 2014).

Managing obsolescence has been always reactive. It focused on cost minimization through optimization techniques in order to develop proactive obsolescence management strategies (Singh & Sandborn, 2006).

I.2.3 Previous work and scientific contribution

Obsolescence problem are studied case by case in the literature. Previous works are about obsolescence management for long lifecycle systems like test equipment (Adams , 2008; Frank & Morgan, 2007; Gorringer, 2006). Obsolescence problem were managed and evaluated from system perspective where the goal is to maintain the system working with full performances. Recommendations and best practices were also described for lifecycle and total cost of ownership optimization.

A big gap is identified in the literature, there is no works who are interested on this risk from an organization perspective, its impact on organization performance: production, supply chain, certification after change... by this case study in an industrial environment, the goal is to explore the impact of the obsolescence on organizations, as it is becoming more and more frequent, to look for new management tools to improve firms robustness and resilience to such

problem. It is important to study the problem from this angle of vision because obsolescence is a big concern for all technological products which different lifecycles ranges.

I.3 Theoretical framework and methodology

This work is interested in involuntary obsolescence. It is when the change of the system or the subsystem or even the part is not wanted by neither the customer nor the manufacturer... (Bartels et al., 2012).

To clarify the research study of the paper, a theoretical framework is proposed and the methodology used to achieve the research goals is explained. The definition of the concepts and the variables, the hypothesis and the research Model are defined in the next section.

The study question

The literature review developed two main questions to which responses seem absent.

- How does obsolescence risk impact organization's performances?
- Do obsolescence management levels reduce the obsolescence impact on organization's performances?

I.3.1 Concepts and variables

Concept 1: C1: Component Obsolescence

V1.1: Proactive management: determination of the condition of the whole system to determine obsolescence data for critical components that have a high vulnerability for obsolescence, insufficient available quantity and will be ambiguous to manage. It requires the ability to forecast obsolescence via a complete process to articulate, review and update system-level obsolescence status (Bartels et al., 2012).

V1.2: Reactive management: Determination of the appropriate and immediate solution from different resolution approaches when components become obsolete. Execution of the

resolution process then documentation or track the actions taken to archive the obsolescence experience to manage future risk (Bartels et al., 2012; Meng et al., 2014).

V1.3: Strategic management: use system data: status, forecasted obsolescence, expected needs, inventory and spares, logistics, business trending, life cycle optimization to determine the combination of reactive resolution and mitigation approaches and design refresh (the set of refreshes) that minimizes the costs (Bartels et al., 2012).

Concept 2: C2: Organization performances

The performances chosen in this study are described below. The choice is based on previous discussion with our industrial and literature considerations.

V2.1: production continuity: The parts obsolescence disturbs the production line and can stop it for a while. As a consequence, the efficiency of the production line and the production rate decrease.

V2.2: Supply Chain Performances: Companies vulnerability to parts obsolescence is aggravated by modern business practices like the reduction of supply chain bases, global sourcing and confidence on supply clusters due to the increasing complexity of supply chains (Gravier & Swartz, 2009).A interruption to one source impacts many buyers In addition, as a consequence, obsolescence cases do not only disturb production but also the supply chain by causing delays on delivery dates.

V2.3: Sustainability and Environmental indicators. The sustainability indicator can be attached to supply chain performances but also to the environmental perspective as sustainability combines economic, social and environmental aspects (Butt & Jones, 2011). Obsolescence impacts mainly electronic components (Rojo, et al., 2012), those components may contain chemicals that are very harmful to the planet. After an electronic component

obsolescence, the challenge is to find a green solution to discard it by recycling for example (Schumacher et al., 2014)

V2.4: Quality and certification costs: Civil aviation systems need to be certified before selling and using them. Certification costs are very high. The change caused by an obsolescence case imposes, in some cases, a new certification or verification so additional delays and costs. The performance of the final product can be also revised and generate additional costs.

I.3.2 Hypothesis

It assumes for this first work that no relationship exists between the variables of the same concept to simplify the study. Further research on their interactions will be done. Study hypothesis from **H1** to **H8** are defined like:

- **H1: C1/ C2:** When obsolescence occurs, organization performances are impacted.
- **H2: C1/V2.1:** The obsolescence risk, when occurs, disturb the production continuity and decrease the production rate and the employees' efficiency.
- **H3: C1/V2.2:** When obsolescence occurs, the supply chain performances are unsettled.
- **H4: C1/V2.3:** When obsolescence occurs, technological waste rise and occasion sustainability and environmental problems.
- **H5: C1/V2.4:** When obsolescence occurs, the solutions like redesign or replacement bring out quality and certification costs.
- **H6: V1.1 /C2:** Proactive management has a positive impact on organization performances as it allows predicting obsolescence risk and evaluating different mitigation strategies costs.
- **H7: V1.2/C2:** Reactive management is the most important management step for obsolescence management; it depends on decision makers' expertise and the available information about different mitigation strategies. It has a negative impact, as in all cases the perturbation will reduce organization performances

- **H8: V1.3/C2:** The strategic management of obsolescence has a positive impact on organization performances as it is a way to mitigate obsolescence risk.

A level of impact is assigned: low, medium, high in order to quantify the impact of the first concept/variable on the second one.

Table AI.1: Summary of the study hypothesis.

	C2	V2.1	V2.2	V2.3	V2.4
C1	High	High	High	High	Medium
V1.1	Medium				
V1.2	High				
V1.3	Medium				

I.3.3 Research model

The aim of this work is to study the impact of different obsolescence management levels on the reduction of the obsolescence impact and the impact of parts obsolescence on organization performances. The different relations to study are described in the figure. On the one hand, the manufacturer deals with a risk called obsolescence (C1), its management and mitigation strategies described in the literature are divided into three levels, the proactive management (V1.1), the reactive management (V1.2) and the strategic management (V1.3). On the other hand, he has to keep the organization performances in a high level. The focus is on four main performances; production continuity (V2.1), Supply chain performances (V2.2), Sustainability and environment (V2.3) and quality and certification (V2.4). The choice to focus on those specific performances is based on our comprehension of the literature review and previous discussions with our industrial partners.

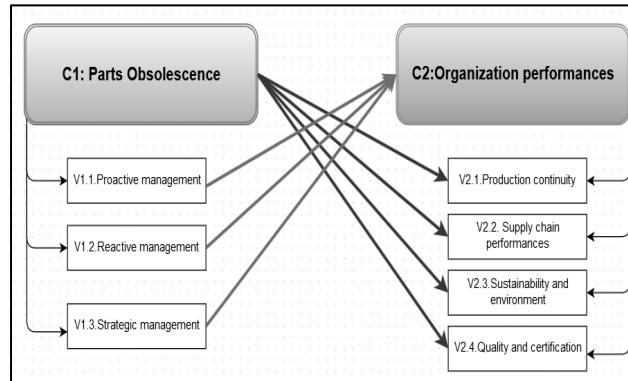


Figure AI.1. summary of the relations between the different concepts

I.4 case study and data collection

A case study seems to represent a critical test to existing theory (Yin, 2013). For the verification of the theory and its hypothesis, a case study within a firm in the aeronautic industry was processed. The data was collected via semi-structured interviews with the company's decision makers.

The respondent has, first, a survey to which he had respond without any ambiguity. The expertise of the respondent and the simplicity of the survey were very useful for the full comprehension of our research questions to get precise and good answers. Then, several interviews were processed. The work was divided into three parts: general information about the company, obsolescence management, quantification of the impact on the organization performances.

Our industrial partner, leader in its domain, suffers since years from the increasing parts obsolescence cases. The nature of the final products accentuates the problem. Avionic products are long life cycle products that need support for long time up to more than 30 years.

I.5 results and analysis

The literature review developed two questions related to the parts obsolescence problem. The work tries to respond to each of research questions relatively to our case study.

Question 1: How does obsolescence risk impact organization's performances?

The case study confirmed our theory; there is no doubt that the parts obsolescence risks disturb the business continuity and impact the organization performances. In our case, the quantification of the impact was subjective, depending on the personal perception of the experts in the firm. The data collected about the impact on performances are described in the next table.

Table AI.2: Expert perceptions about obsolescence impact on organization performances

	C2	V2.1	V2.2	V2.3	V2.4
C1	High	Medium	High	No data	Medium
V1.1	No data				
V1.2	High				
V1.3	No data				

Expert respondent from the case company confirm that obsolescence has a negative impact on organization performances, the severity and the performance indicators impacted depends on the obsolete component, the results given in the previous table are a global approximation. He assumes that managing obsolescence can be a very difficult task when an important unit becomes obsolete like avionic box. The change needed in this case can go up to reconfigure of the plant and renew the flying certification. There is no data for **H6** and **H8** because proactive and strategic management doesn't exist in the company's obsolescence management system. The same for **H4**, no data is available because the firm doesn't manage its technological waste and the most cases of obsolescence are a cessation of a component so there is no obsolete stock or technological waste to manage.

To summarize the results of our case study, our hypothesis was verified by confirming the impact of obsolescence on organization performances. Obsolescence cases have an impact in the studied performances as described in the table I.2: production continuity, supply chain performances, sustainability and environment and quality and certification. About the management levels, it can surely improve the management process, help to take the best decisions and reduce the impact of the risk upon the firm according to the study results.

The respondent also proposed some empirical recommendations for obsolescence management in order to avoid additional costs. First, he agrees with the literature about the necessity to establish a multi-level obsolescence management; proactive level which includes a prediction or a forecasting tool, a reactive level to react efficiently and quickly to any obsolescence case especially sudden ones and a strategic level by allocating the sufficient resources: time, money and humans to manage obsolescence. Second, he insists about a good planning to avoid obsolescence cost and increase the management system efficiency. Finally, he recommends having good relations with suppliers from the first and the second level in the supply chain in order to prevent supply chain disruptions. This study allowed us to identify some weakness on obsolescence management systems. First, experts are aware about the risk but there is no plan to allocate sufficient resources. Second, obsolescence management is mainly reactive so the solutions taken before were the optimal ones. Finally, there is no care about technological waste management in order to have greener industry.

Question 2: Do obsolescence management levels reduce the obsolescence impact on organization performances?

In the environment of our study, the firm opted only for a reactive strategy to mitigate and manage obsolescence risk. They are now working on tools to forecast obsolescence as a proactive action and trying to make a complete obsolescence management process. The way they deal with obsolescence is a conventional one. The obsolescence notices are sent by the supplier about 10 months before the part production stops. At this moment, decision makers start looking for the suitable solution within the actual conditions. In many cases, production stops and creates additional problems like costs and delays. Our experts believe that, they

would be able to reduce obsolescence costs and its impact on both system and organization performances if they could predict obsolescence earlier. The strategic obsolescence management is still until now unrecognizable. To respond to the research question, managing the obsolescence risk on the three main levels: proactive, reactive and strategic reduce the obsolescence impact on both system and organization. Proactive and reactive levels are recognized as effective for obsolescence management and mitigation but the strategic level is still underrated as a good way to help firms to deal with that risk.

I.6 Conclusion and further research

The research studies the obsolescence problem from an organization perspective, a problem that was always studied from system perspective. This presents the first stone to build a new research direction in order to evolve with the dynamic technological progress and respond to the industrial need to mitigate and resolve obsolescence cases. The scientific contribution of this paper is to point the hard impact of this risk on organizations which was always ignored. The proof is given by industrial.

This explorative study provides valuable ways and directions to improve current obsolescence management systems by the introduction of the organizations performances. Quantify the impact of the risk on the performances appears to depend on two factors: the obsolescence process management and the company policies. Furthermore, this empirically based work highlight on the huge evolution of the obsolescence risk that constitutes a serious concern in all the technological industries.

Despite the efforts made in scientific research in obsolescence management, the current management systems remain primarily "reactive". In practice, decisions makers are not aware enough about the value of both proactive and strategic management. The current trend of accelerated technological development is alerting so the need for a robust management process is a necessity for higher performances, more resilience to obsolescence risk and a greener industry.

A case study is not a basis for a scientific generalization (Yin, 2013) so further work will focus on this and establish a more general theory. There is no doubt that obsolescence impacts organization performances and more importance need to be given to it as the risk is expanding in severity and frequency. Studying the diffusion of the perturbation in the organization and the integration of the organization performances in the decision-making tools is a priority to deal better with the risk, and it represents the goal of the big research project to make firms more performing, robust, resilient and green.

ANNEXE II

USING MULTICRITERIA DECISION MAKING METHODS TO MANAGE SYSTEMS OBSOLECENCE

Imen Zaabar ^{a *}, Yvan Beauregard ^a and Marc Paquet ^b

^a École de Technologie Supérieure, Département de génie mécanique, 1100 Rue Notre Dame
O, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

^b École de Technologie Supérieure, Département de génie des systèmes, 1100 Rue Notre
Dame O, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

Article présenté à la conférence IEEE International Conference on Industrial Engineering and
Engineering Management, Décembre 2018

Abstract

Systems obsolescence may cause huge invisible internal cost through misjudgment. It leads to many defects related to the manufacturing system and its environment. While its management is complex, composed by multiple factors and stakeholders, the current tools are still minimal and purely quantitative using cost optimization. Considering different actors seems essential to ensure a reliable mitigation and resolution strategy. This paper aims to develop an MCDM model specific to obsolescence management by expanding decision criteria and using a non-compensatory and dynamically weighted ELECTRE III. The goal is to ensure a robust, sustainable and green manufacturing. The MCDM tool was applied to the problem and performed on two case studies from the literature, using DIVIZ platform. The model results were compared to previous studies and shows that the decision made changes widely thus affects the manufacturing performance.

Keywords: ELECTRE III, MAUT, multicriteria decision making, Obsolescence management, Sustainability

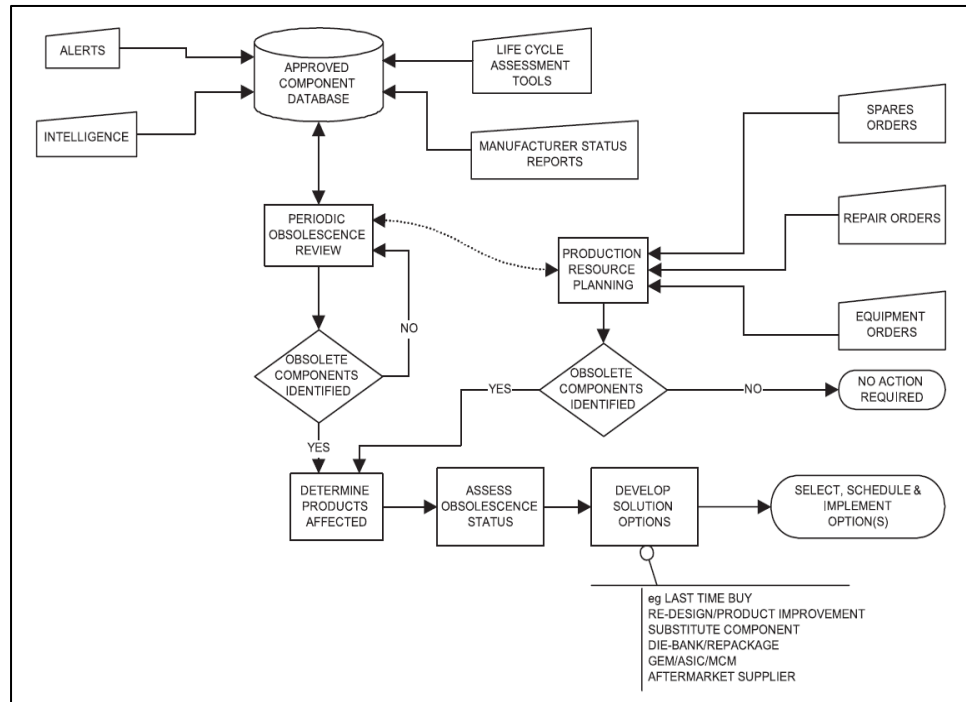
II.1 Introduction

Involuntary obsolescence is an unwanted change. It, for example, costs the US Department of Defense (DoD) more than \$750 million annually. Neither the customer nor the manufacturer necessarily wants to change the system. The risk is also called DMSMS (Diminishing manufacturing Sources and Material Shortages) by the DOD) and it specifically refers to the loss of the ability to procure required materials, parts or technology (Bartels et al., 2012). In the past decades, parts obsolescence has become an increasingly common feature of the global economy, often precipitated by technological evolution and innovation in addition to some unforeseen incidents like the disappearing of the OEM (Original Equipment Manufacturer) due to natural, political or economical issues. An OMP (Obsolescence Management Plan (Figure AII.1)) must, then, be developed and improved continually to ensure adequate selection, synchronized implementation, and tracking of relevant obsolescence management information and activities to ensure a robust and resilient performance (Bartels et al., 2012; Wilkinson, 2015).

Ideally, parts obsolescence has to be managed within three levels: reactive, proactive, and strategic. Proactive and strategic management are about proactively tracking life cycle information on vulnerable parts in order to avoid/prevent obsolescence-driven risks such as production stops and expensive redesigns while reactive management is determining an appropriate and immediate solution to the problem of components becoming obsolete, executing the resolution process, and documenting/tracking the actions taken.

Common reactive DMSMS management approaches include: lifetime buy, bridge buy, component replacement, buying from aftermarket sources, uprating, emulation, and salvage (Sandborn, 2008). When it occurs, decision makers have to choose up for the best resolution strategy whatever to replace the obsolete component, update the system or to look for any other feasible alternative. Depending on multiple factors such as system support life period, volume of production and the criticality of the part, the manufacturer must decide which strategy to adopt to handle parts obsolescence issues. The decision is hard to make considering the

complexity of the problem, the eventual impacted performances (Zaabar et al.,2017) and uncertainty related to technological evolution (Wilkinson, 2015).



AII.1 Example of an OMP by Smiths Industries

II.2 Literature review

Decision-making tools applied to obsolescence management are limited in the literature since the problem is relatively new. Some authors tried to solve the problem using different approaches. Tsai & Chen, 2012 proposed a methodology to manage obsolescence risk using the project management theory. Fuzzy sets were applied as a way to model uncertainty by calculating the alternatives performances. The algorithm searches for the best-solved project and last order quantity. Kumar & Saranga, 2010 have developed a mathematical model that calculates the impact of obsolescence mitigation strategies (Life Time Buy and redesign) on the system's Total Cost of Ownership (TCO). The resolution took a classical multi-arm bandit (MAB) and restless bandit models to identify the best strategy. Meng et al., 2014 and Zheng et al., 2015 developed a model to calculate the optimal LTB quantity and design refresh dates.

These studies have two main limitations, only the two options LTB and redesign are considered as resolution strategies and the cost were used as a unique criterion to make decision. As system's obsolescence is a very complex context with multiple options and many criteria, the use of Multicriteria Decision Making methods (MCDM) was unavoidable to solve the problem. To the knowledge of the authors, only Adetunji et al., 2018 and Pingle, 2015 worked on multicriteria decision making on obsolescence management. Both used MAUT to select the most suitable alternative. While Adetunji et al., 2018 applied it in the design phase, Pingle, 2015 used it in reactive context. Their main gap is the employed method which doesn't easily deal with both ordinal and cardinal criteria. In this paper, we improved their MCDM models by identifying relevant criteria and using one other MCDM modified method that can perform and supports better the obsolescence management context. A comparison is performed to evaluate the performance of different technics.

II.3 Methodology

The paper aims to propose a model to manage system obsolescence using a dynamic weighting and a non-compensative multicriteria decision making method. Its main contributions are:

- Introducing new criteria (qualitative and qualitative) that must be considered in the decision-making process. Those criteria are enforced by the current industrial environment for the purpose of achieving a sustainable and green business. They were identified from the literature and the several discussions with many important actors in the aeronautics industry.
- Determining criteria's weights using a dynamic weighting method.
- Using non-compensatory ranking multicriteria decision method: ELECTRE III that can handle ordinal criteria and uncertainty. Actually, criteria are completely independent and cannot compensate each other.
- Comparing the proposed model results with previous studies.

To meet the research objectives: first, a literature review was performed to analyze previous works and identify the set of criteria and alternatives. Second, a dynamic method based on

obsolete component characteristics was applied to determine the criteria's weights. Then, a choice was made to select the most appropriate MCDM tool to the obsolescence management problem. Finally, two case studies from the literature were performed and results were compared to previous ones in order to expand a robust multicriteria decision making tool on obsolescence management systems.

II.3.1 The decision model

The decision model parameters in obsolescence management are quite related to the case. It depends on available options, the company's policies and ethics. We define here a general case with all obsolescence resolution strategies representing the alternatives set and criteria set.

The alternatives set: the alternatives set depends on when the model is applied. If the decision has to be made on the design part (Adetunji et al., 2018), then the alternatives set represents the different options of similar products that can offer the required functionality. If the decision has to be made after the manufacturer had been notified or not by the event of obsolescence of one or more components or subsystems, then the alternatives set represents the possible obsolescence resolution strategies: lifetime buy, bridge buy, component replacement, buying from aftermarket sources, uprating, emulation, and salvage (Sandborn, 2008). In the literature, only the lifetime buy and the redesign were considered as possible solutions. It doesn't reflect the reality where many other options are possible and are a part of the suggested model. Thus, this paper contributes to develop a useful tool to make obsolescence management decisions within companies more responsible, sustainable and efficient.

The criteria set: in multiple previous studies (Kleyner et al., 2016; Menget al., 2012; Prabhakaret al., 2012), the cost was the unique criterion to decide which option to take when obsolescence occurs although, the best solution, in the modern and complex manufacturing environment, is not necessarily the less expensive. Many other factors have to be considered. Recently, some authors (Adetunji et al., 2018; Pingle, 2015) introduced an important number

of criteria to consider in decision making. Based on their work, literature and industrial collaboration. The final set of criteria is defined below:

The criteria set was developed to make the model more general and easily applicable on both reactive and proactive (in the design phase) obsolescence management levels.

Table AII.1 The set of criteria used to evaluate obsolescence management alternatives

	Criterion	Assessment
1	Cost	min
2	Functionality	max
3	Vendor reliability	max
4	Life cycle duration/ extension	max
5	Open architecture and standards	max
6	Technology Readiness Level	max
7	Implementation and training time	min
8	Environmental impact	min
9	Customer satisfaction	max

The main contribution of this work is to introduce important criteria as recommended (lifecycle duration/extension, Environmental impact and customer satisfaction) and apply a dynamically weighted non compensatory MCDM algorithm (ELECTRE III). The general study framework is described below:

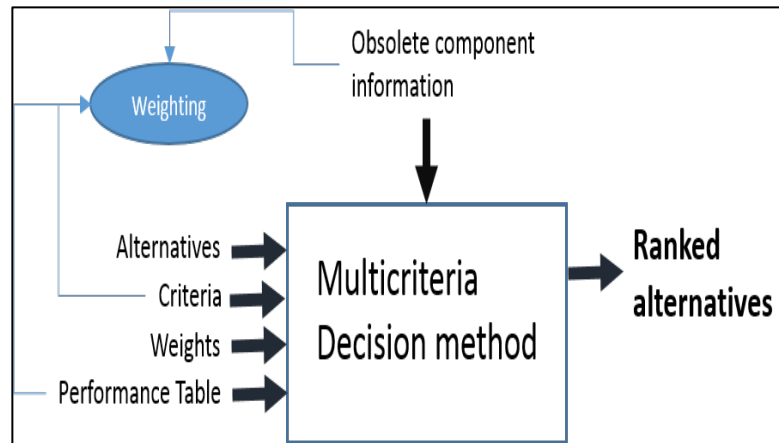


Figure AII.2 The study's general framework

II.3.2 The resolution algorithm

ELECTRE III: ELECTRE III is a popular MCDM method that considers uncertainty (Roy, 1990). It is based on the axiom of partial comparability to handle preferences. Four comparison relations: *I*, indifference; *P*, heavy preference; *Q*, light preference and *R*, non-comparability and three comparison parameters: the thresholds of preference (p); indifference (q) and veto (v). The method uses concordance and discordance indices to establish the alternatives ranking. It takes as input: the criteria and their weights, the alternatives and their performances. A simplified ELECTRE III algorithm is described in Figure II.2.

Determining the weights is a very sensitive phase in multicriteria decision making and especially in systems obsolescence management. The weights largely depend on the obsolete component, the obsolete systems lifecycle, the company's policies, the current standards and regulations as each case is completely different (Wilkinson, 2015).

In this paper, a general algorithm is described and the model can be applied in all obsolescence cases by covering all possible alternatives, relevant criteria and dynamic weighting method while the performance table is to be calculated case by case. The dynamic weighting method considers component information like criticality and lifecycle duration, systems category and

performance values to determine the weights. It means that some criteria are more important than others, for example if the component in question contains harmful chemical ingredients, the environmental criteria will have more important weight compared to its weight in other cases when the component in question is biodegradable.

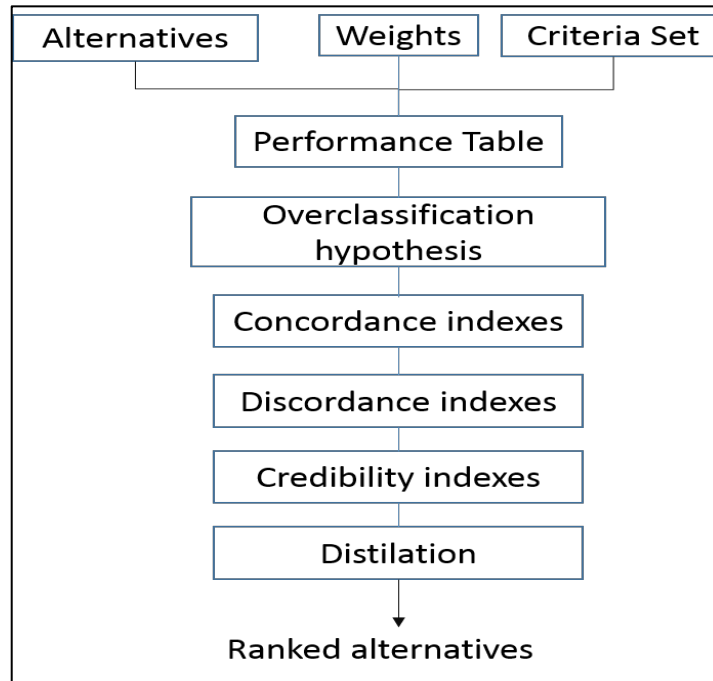


Figure AII.3 ELECTRE III simplified Algorithm

II.4 Case studies

Because of the lack of sufficient data from case studies performed by (Adetunji et al., 2018) and (Pingle, 2015), additional data were generated based on scientific and industrial collaboration. Diviz platform (Meyer & Bigaret, 2012) was used to perform different calculations. Data used and results are presented below:

II.4.1 Case study

In the first case study, (Adetunji et al., 2018) solved the problem of the system of reference to be used in the design of a new product in the DOD. Among 4 alternatives: System A (MCS

DDG-51 class), System B (MCS CG-47 class), System C (MCS CVN-68 class), System D (MCS LPD-17 class), and 10 criteria, the author used MAUT, SAW, WPM and TOPSIS to help in the decision-making process. Based on his work, Table II.2 describes the normalized performance table. Weights were calculated via surveys and interviews. This case was done in the product design which is a strategic mitigation action.

Table AII.2 Case 1 normalized performance table and weights

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Alternative 1	0.190	0.110	0.055	0.148	0.110	0.066	0.088	0.066	0.059
Alternative 2	0.171	0.120	0.052	0.145	0.096	0.61	0.084	0.062	0.060
Alternative 3	0.184	0.088	0.060	.0.150	0.108	0.070	0.090	0.061	0.059
Alternative 4	0.163	0.119	0.056	0.144	0.106	0.060	0.085	0.070	0.056
Weights	0.19	0.12	0.06	0.15	0.11	0.07	0.09	0.13	0.08

For the second case study is taken from (Pingle, 2015), where the author applied MAUT to help decision makers decide which from available options: substitute, LTB and alternative. The study considered many different factors to which objective hierarchy, utility functions and weights were calculated. The Table II.3 describes the performance table and the weights.

Table AII.3 Case 2 performance table and weights

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
Alternative 1	425.068	2	16	8	1	2	12	60	3
Alternative 2	418.575	4	16	8.5	4	1	9	100	2
Alternative 3	504.382	4	18	8	3	2	11	80	1
Weights	0.2	0.12	0.08	0.1	0.05	0.05	0.1	0.25	0.05

II.4.2 Results

ELECTRE III and the Dynamically weighted ELECTRE III were performed on the two described case studies. The results are shown on Table I. 4 and Table II.5 for respectively case 1 and case 2. These will be discussed in the next section.

Table AII.4 Case 1 results

	MAUT (Adetunji et al., 2018)	ELECTRE III	Dynamically weighted ELECTRE III
Alternative 1	1	2	2
Alternative 2	4	1	1
Alternative 3	2	4	4
Alternative 4	3	3	3

Table AII.5 Case 2 results

	MAUT (Pingle, 2015)	ELECTRE III	Dynamically weighted ELECTRE III
Alternative 1	2	2	1
Alternative 2	1	1	3
Alternative 3	3	3	2

II.4.3 Discussion

The three MCDA methods gave different results. The difference is induced by the difference between the models' inputs, the idea here is not to show that the results are different but to show that the decision taken without considering all important criteria and meaningful weights can be very dangerous to the manufacturer and can cause harmful consequences on both manufacturer and the manufacturing environment. ELECTRE III and weighted ELECTRE III had the same result for the 1st case because the weights proposed by the author (Adetunji et al., 2018) and those calculated are equal. It is not the same thing for the second case where the ranking completely changed because the environmental impact criteria which had a very important weight so the worst alternative on this criterion was penalized and got the last rank.

II.5 Conclusion

The paper aims to go in deep the decision-making process in system's obsolescence management. Obsolescence costs big not only from an economical aspect but also for business continuity and environment (Gravier & Swartz, 2009; Herat, 2008). Those factors need to be

considered in the OMP and the decision-making process for sustainable and green industry. Including such complex criteria requires strong multicriteria decision making tool which is capable to handle a big number of cardinal and ordinal criteria and considering uncertainty due to the rapid technological evolution. In this paper, important criteria were introduced to help take the most sustainable solution using a robust multicriteria tool (ELECTRE III). Uncertainty was considered by using the ELECTRE III method and by developing a dynamic way to determine weights. This study has many limitations. It needs further validation and applicability on real world problems. Although the model was developed with industrial collaboration, no real case was studied to measure the tool effectiveness. The next step is to implement the weighting method using machine learning and validate the model efficiency by measuring their impact.

BIBLIOGRAPHIE

- Aalaei, A., & Davoudpour, H. (2017). A robust optimization model for cellular manufacturing system into supply chain management. *International Journal of Production Economics*, 183, 667-679. doi: 10.1016/j.ijpe.2016.01.014
- Acevedo-Ojeda, A., Contreras, I., & Chen, M. (2020). Two-level lot-sizing with raw-material perishability and deterioration. *Journal of the Operational Research Society*, 71(3), 417-432. doi: 10.1080/01605682.2018.1558942
- Adams, C. (2005). Getting a handle on COTS obsolescence. *Avionics Magazine*, 1.
- Adams Jr, W. L. (2008). Solving the U S. Air Force's ATS proliferation problem - The VDATS solution. Dans *IEEE Autotestcon 2008, September 8, 2008 - September 11, 2008* (pp. 598-600). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/AUTEST.2008.4662688.
- Adelbratt, T., & Montgomery, H. (1980). Attractiveness of decision rules. *Acta Psychologica*, 45(1-3), 177-185.
- Adetunji, O. (2021). The Application of Simple Additive Bayesian Allocation Network Process in System Obsolescence. Dans *Decision Making*. IntechOpen.
- Adetunji, O., Bischoff, J., & Willy, C. J. (2018). Managing system obsolescence via multicriteria decision making. *Systems Engineering*, 21(4), 307-321. doi: 10.1002/sys.21436.
- Alhourani, F. (2013). Clustering algorithm for solving group technology problem with multiple process routings. *Computers & Industrial Engineering*, 66(4), 781-790. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.09.002>
- APPLiA. (2018). *The home appliance industry in Europe*. Repéré à <https://applia-europe.eu/statistical-report-2017-2018/>
- Ashraf, M., & Hasan, F. (2015). Product family formation based on multiple product similarities for a reconfigurable manufacturing system. *International Journal of Modelling in Operations Management*, 5(3), 247-265.
- Atterbury, R. (2005). Component Obsolescence Group. *United Kingdom*.
- Awasthi, A. K., Li, J., Koh, L., & Ogunseitan, O. A. (2019). Circular economy and electronic waste. *Nature Electronics*, 2(3), 86-89.

- Bachér, J., Dams, Y., Duhoux, T., Deng, Y., Teittinen, T., & Mortensen, L. F. (2020). Electronic products and obsolescence in a circular economy.
- Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). *The global e-waste monitor 2017: Quantities, flows and resources*. United Nations University, International Telecommunication Union, and
- Bartels, B., Ermel, U., Sandborn, P., & Pecht, M. G. (2012). *Strategies to the Prediction, Mitigation and Management of Product Obsolescence* (Vol. 87). John Wiley & Sons.
- Battini, D., Calzavara, M., Isolan, I., Sgarbossa, F., & Zangaro, F. (2018). Sustainability in material purchasing: A multi-objective economic order quantity model under carbon trading. *Sustainability (Switzerland)*, 10(12). doi: 10.3390/su10124438. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85057317997&doi=10.3390%2fsu10124438&partnerID=40&md5=995e7dfc1ef524e1591acd0c72b1c21b>
- Baykasoglu, A., & Gorkemli, L. (2015). Agent-based dynamic part family formation for cellular manufacturing applications. *International Journal of Production Research*, 53(3), 774-792. doi: 10.1080/00207543.2014.924634
- Baykasoglu, A., & Gorkemli, L. (2017). Dynamic virtual cellular manufacturing through agent-based modelling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 30(6), 564-579. doi: 10.1080/0951192X.2016.1187294. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2016.1187294>
- Belkhir, L., & Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177, 448-463.
- Besbes, M., Leclaire, P., Souifi, A., Mrabah, A., & Zolghadri, M. (2025). A New Tool for Obsolescence Management: Preliminary Study of Stakeholder Needs. Dans (pp. 184-192). Springer Nature Switzerland.
- Borenich, A., Dickbauer, Y., Reimann, M., & Souza, G. C. (2020). Should a manufacturer sell refurbished returns on the secondary market to incentivize retailers to reduce consumer returns? *European Journal of Operational Research*, 282(2), 569-579. doi: 10.1016/j.ejor.2019.09.049
- Boukabache, H., Mohanan, S. K., Ducos, G., Laforge, C., Pangallo, M., Perrin, D., . . . Forkel-Wirth, D. (2025). 30 Years of Electronics Evolution for CERN Safety Radiation Monitoring. *IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE*, 72(7), 2173-2182. doi: 10.1109/TNS.2024.3352410

- Bowlds, T. F., Fossaceca, J. M., & Iammartino, R. (2018). Software obsolescence risk assessment approach using multicriteria decision-making. *Systems Engineering*, 21(5), 455-465. doi: 10.1002/sys.21446
- Büchi, G., Cugno, M., & Castagnoli, R. (2020). Smart factory performance and Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 150. doi: 10.1016/j.techfore.2019.119790
- Buckley, J. J. (1985). Fuzzy hierarchical analysis. *Fuzzy Sets and Systems*, 17(3), 233-247.
- Budka, M. (2013). Clustering as an example of optimizing arbitrarily chosen objective functions. Dans *Advanced Methods for Computational Collective Intelligence* (pp. 177-186). Springer.
- Bullick, J. (2021). PLM for automation components. *Operations Engineer*, 22-23.
- Butt, T. E., & Jones, K. G. (2011). Sustainability of the built environment - Development of an intelligent decision system to support management of energy-related obsolescence. Dans *3rd International Conference on Intelligent Decision Technologies, IDT'2011, July 20, 2011 - July 22, 2011* (Vol. 10 SIST, pp. 907-919). Springer. doi: 10.1007/978-3-642-22194-1_89. Repéré à http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-22194-1_89
- Büyüközkan, G., & Karabulut, Y. (2018). Sustainability performance evaluation: Literature review and future directions. *Journal of Environmental Management*, 217, 253-267.
- Cao, H., & Folan, P. (2012). Product life cycle: the evolution of a paradigm and literature review from 1950–2009. *Production Planning & Control*, 23(8), 641-662.
- Chandra Sekhar, N., & Laxminarayana, P. (2017). Development of visual identification system for classification of part family for medium scale industries. *International Review of Mechanical Engineering*, 11(10), 774-779. doi: 10.15866/ireme.v11i10.13400.
- Chandrasekharan, M. P., & Rajagopalan, R. (1986). MODROC: an extension of rank order clustering for group technology. *International Journal of Production Research*, 24(5), 1221-1233. doi: 10.1080/00207548608919798
- Charrad, M., Ghazzali, N., Boiteau, V., Niknafs, A., & Charrad, M. M. (2014). Package 'nbcust'. *Journal of statistical software*, 61, 1-36.
- Chen, P. P.-S. (1976). The entity-relationship model—toward a unified view of data. *ACM transactions on database systems (TODS)*, 1(1), 9-36.
- Chenavaz, R., Dimitrov, S., Figge, F., & Schlosser, R. (2025). Optimal product replacement: The dark sides of technological progress and the circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 220. doi: 10.1016/j.resconrec.2025.108341

- Chien-Ming, H., Romero, J. A., Osterman, M., Das, D., & Pecht, M. (2019). Life cycle trends of electronic materials, processes and components. *Microelectronics Reliability*, 99, 262-276. doi: 10.1016/j.microrel.2019.05.023
- Clay, W. S., Sykora, R. A., & Morrison, J. R. (2010). Systems and methods for automatically determining and/or inferring component end of life (EOL): Google Patents.
- Commission, I. E. (2007). *Obsolescence management – Application guide* 62402. International Electrotechnical Commission.
- Davies, D. L., & Bouldin, D. W. (1979). A cluster separation measure. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, (2), 224-227.
- Desgraupes, B. (2017). Clustering indices. *University of Paris Ouest-Lab Modal'X*, 1, 34.
- Echegaray, F. (2016). Consumers' reactions to product obsolescence in emerging markets: the case of Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 134, 191-203. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.08.119
- Efendigil, T., Ozkir, V., Demirel, N. C., Demirel, T., & Ondemir, O. (2012). A framework proposal upon the estimation of electronic-waste products in Istanbul. Dans *10th International Fuzzy Logic and Intelligent Technologies in Nuclear Science Conference, FLINS 2012, August 26, 2012 - August 29, 2012* (Vol. 7, pp. 1184-1189). World Scientific Publishing Co. Pte Ltd.
- Eionet (Producteur). (2020). Electronic products and obsolescence in a circular economy. *ETC/WMGE 2020/3*.
- Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M., & Stahl, D. (2011). *Cluster analysis* 5th ed: John Wiley.
- Ewastemonitor. (2020). The Global E-waste Monitor 2020. Repéré le March 1st à <http://ewastemonitor.info/>
- Feil, A. A., Schreiber, D., Haetinger, C., Strasburg, V. J., & Barkert, C. L. (2019). Sustainability indicators for industrial organizations: systematic review of literature. *Sustainability*, 11(3), 854.
- Feldman, K., & Sandborn, P. (2007). Integrating technology obsolescence considerations into product design planning. Dans *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 48051, pp. 981-988).
- Feldman, K., & Sandborn, P. (2008). Integrating technology obsolescence considerations into product design planning. Dans *ASME/IEEE International Conference on Mechatronic*

and Embedded Systems and Applications, presented at - 2007 ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, IDETC/CIE2007, September 4, 2007 - September 7, 2007 (Vol. 4, pp. 981-988).

- Feng, D., Singh, P., & Sandborn, P. (2007). Lifetime buy optimization to minimize lifecycle cost. Dans *Proceedings of the 2007 aging aircraft conference*.
- Figueira, J., Mousseau, V., & Roy, B. (2005). ELECTRE methods. Dans *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys* (pp. 133-153). Springer.
- Fiksel, J. (2006). Sustainability and resilience: toward a systems approach. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 2(2), 14-21.
- Forti, V., Balde, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential.
- Frank, B., & Morgan, R. L. (2007). Obsolescence mitigation and management of electronics test equipment. Dans *42nd Annual IEEE AUTOTESTCON Conference 2007, September 17, 2007 - September 20, 2007* (pp. 527-536). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/AUTEST.2007.4374264.
- Gauss, L., Lacerda, D. P., & Cauchick Miguel, P. A. (2020). Module-based product family design: systematic literature review and meta-synthesis. *Journal of Intelligent Manufacturing*. doi: 10.1007/s10845-020-01572-3.
- Ghosh, T., & Dan, P. K. (2012). Particle swarm optimisation in development of component families using classification and coding system: A case study in an Indian manufacturing firm. *International Journal of Services and Operations Management*, 13(4), 441-456. doi: 10.1504/IJSOM.2012.050140
- Ghosh, T., Modak, M., & Dan, P. K. (2011). Sappfocs: A metaheuristic based approach to part family formation problems in group technology. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 6(3), 231-240. doi: 10.1080/17509653.2011.10671167
- Globerson, S. (1985). Issues in developing a performance criteria system for an organization. *International Journal of Production Research*, 23(4), 639-646.
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT press.
- Gorringer, C. (2006). The pitfalls of replacing obsolete instrumentation. *EE: Evaluation Engineering*, 45(6), 12-18.

- Goyal, K. K., Jain, P. K., & Jain, M. (2013). A comprehensive approach to operation sequence similarity based part family formation in the reconfigurable manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 51(6), 1762-1776. doi: 10.1080/00207543.2012.701771
- Gravier, M. J., & Swartz, S. M. (2009). The dark side of innovation: Exploring obsolescence and supply chain evolution for sustainment-dominated systems. *Journal of High Technology Management Research*, 20(2), 87-102. doi: 10.1016/j.hitech.2009.09.001.
- Guitouni, A., & Martel, J.-M. (1997). *Some guidelines for choosing an MCDA method appropriate to a decision making context*. Faculté des sciences de l'administration de l'Université Laval.
- Gupta, A., Jain, P. K., & Kumar, D. (2013). A novel approach for part family formation using K-means algorithm. *Advances in Manufacturing*, 1(3), 241-250. doi: 10.1007/s40436-013-0032-3.
- Gupta, A., Jain, P. K., & Kumar, D. (2014). Part family formation for reconfigurable manufacturing system using K-means algorithm. *International Journal of Internet Manufacturing and Services*, 3(3), 244-262. doi: 10.1504/IJIMS.2014.062442.
- Hachicha, W., Masmoudi, F., & Haddar, M. (2008). Formation of machine groups and part families in cellular manufacturing systems using a correlation analysis approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 36(11), 1157-1169. doi: 10.1007/s00170-007-0928-9.
- Ham, I., Hitomi, K., & Yoshida, T. (1985). Layout planning for group technology. Dans *Group Technology* (pp. 153-169). Springer.
- Hasan, F., & Jain, P. K. (2016). A neural network-based approach for part family classification for a reconfigurable manufacturing system. *International Journal of Operational Research*, 25(2), 143-168.
- Hasan, S. M., Baqai, A. A., Butt, S. U., & Zaman, U. K. q. (2018). Product family formation based on complexity for assembly systems. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(1), 569-585. doi: 10.1007/s00170-017-1174-4.
- Hemdi, A. R., Saman, M. Z. M., & Sharif, S. (2010). Sustainability evaluation for decision making. Dans *Proceedings of the 11 Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference, APIEMS2010, Melaka, Malaysia* (pp. 1-6).
- Herald, T., & Genaw, D. (2006). Technology and obsolescence sustainment for integrated systems. Dans *16th Annual International Symposium of the International Council on Systems Engineering, INCOSE 2006* (Vol. 1, pp. 456-471).

- Herald, T. E., & Ramirez-Marquez, J. E. (2012). System element obsolescence replacement optimization via life cycle cost forecasting. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2(8), 1394-1401. doi: 10.1109/TCPMT.2012.2201218
- Herat, S. (2007). Sustainable management of electronic waste (e-waste). *Clean - Soil, Air, Water*, 35(4), 305-310. doi: 10.1002/clen.200700022
- Herat, S. (2008). Recycling of cathode ray tubes (CRTs) in electronic waste. *Clean - Soil, Air, Water*, 36(1), 19-24. doi: 10.1002/clen.200700082
- Hitt, E. F., & Schmidt, J. (1998). Technology obsolescence (TO) impact on future costs. Dans *17th DASC. AIAA/IEEE/SAE. Digital Avionics Systems Conference. Proceedings (Cat. No. 98CH36267)* (Vol. 1, pp. A33-31). IEEE.
- Hu, G., & Bidanda, B. (2009). Modeling sustainable product lifecycle decision support systems. *International Journal of Production Economics*, 122(1), 366-375.
- Huang, C.-M., Romero, J. A., Osterman, M., Das, D., & Pecht, M. (2019). Life cycle trends of electronic materials, processes and components. *Microelectronics Reliability*, 99, 262-276.
- Hubert, L., & Arabie, P. (1985). Comparing partitions. *Journal of classification*, 2(1), 193-218.
- Hung, W. L., Yang, M. S., & Lee, E. S. (2011). Cell formation using fuzzy relational clustering algorithm. *Mathematical and Computer Modelling*, 53(9-10), 1776-1787. doi: 10.1016/j.mcm.2010.12.056
- IEC, I. E. C. (2019). *IEC 62402:2019*.
- Ilić, O. R. (2014). An e-Learning tool considering similarity measures for manufacturing cell formation. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(3), 617-628. doi: 10.1007/s10845-012-0709-7.
- IPC. (2020). Electronics Manufacturing Supports More Than 5.3 Million U.S. Jobs and Almost 4% of U.S. GDP, Says IPC. Consulté le 06/06/2022
- Jenab, K., Noori, K., Weinsier, P. D., & Khoury, S. (2014). A dynamic model for hardware/software obsolescence. *International Journal of Quality and Reliability Management*, 31(5), 588-600. doi: 10.1108/IJQRM-03-2013-0054.
- Jennings, C., Dazhong, W., & Terpenney, J. (2016). Forecasting Obsolescence Risk and Product Life Cycle With Machine Learning. *IEEE Transactions on Components, Packaging*

and *Manufacturing Technology*, 6(9), 1428-1439. doi: 10.1109/TCPMT.2016.2589206.

Kamalakaran, R., & Pandian, R. S. (2018). A Tabu Search strategy to solve cell formation problem with ratio level data. *International Journal of Business Intelligence and Data Mining*, 13(1-3), 209-220.

Kassambara, A. (2017). *Practical guide to cluster analysis in R: Unsupervised machine learning* (Vol. 1). STHDA.

Khorasgani, S. M. S., & Ghaffari, M. (2018). Developing a cellular manufacturing model considering the alternative routes, tool assignment, and machine reliability. *Journal of Industrial Engineering International*, 14(3), 627-636. doi: 10.1007/s40092-017-0239-1.

Kleyner, A., Elmore, D., & Ieee. (2016). Using Reliability and Warranty Data to Determine the Optimal Number of Parts for a Lifetime Buy. Dans *Annual Reliability and Maintainability Symposium 2016 Proceedings*. New York.

Kottemann, J. E., & Davis, F. D. (1991). Decisional conflict and user acceptance of multicriteria decision-making aids. *Decision Sciences*, 22(4), 918-926.

Kuehn, L. (1984). P-3 Program Office Component Obsolescence Planning Guide. Dans *Prepared for NAVAL Air Systems Command*.

Kumar, L., & Jain, P. K. (2008). Part-machine group formation with operation sequence, time and production volume. *International Journal of Simulation Modelling*, 7(4), 198-209. doi: 10.2507/IJSIMM07(4)4.113

Kumar, L., & Jain, P. K. (2009). Part-machine group formation with ordinal-ratio level data & production volume. *International Journal of Simulation Modelling*, 8(2), 90-101. doi: 10.2507/IJSIMM08(2)3.125

Kumar, U. D., & Saranga, H. (2010). Optimal selection of obsolescence mitigation strategies using a restless bandit model. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 170-180.

Kusiak, A., & Cho, M. (1992). Similarity coefficient algorithms for solving the group technology problem. *International Journal of Production Research*, 30(11), 2633-2646. doi: 10.1080/00207549208948181.

Lebart, L., MORINEAU, A., & PIRON, M. (2000). Statistique exploratoire multidimensionnelle.

- Legendre, P., & Birks, H. J. B. (2012). Clustering and partitioning. Dans *Tracking environmental change using lake sediments* (pp. 167-200). Springer.
- Li, Y., & Mathiyazhagan, K. (2018). Application of DEMATEL approach to identify the influential indicators towards sustainable supply chain adoption in the auto components manufacturing sector. *Journal of Cleaner Production*, 172, 2931-2941.
- Liu, G. Y., Li, S., & Wang, Y. L. (2014). Part family formation based on clustering algorithm and BP network. Dans *4th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering, ADME 2014, July 26, 2014 - July 27, 2014* (Vol. 635-637, pp. 1586-1589). Trans Tech Publications Ltd. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.635-637.1586.
- Livingston, H. (2000). GEB1: Diminishing manufacturing sources and material shortages (DMSMS) management practices. Dans *Proceedings of the DMSMS Conference* (pp. 21-24).
- Livingston, H. (2007). Avoiding counterfeit electronic components. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 30(1), 187-189.
- Lukasiewicz, J. (1976). *Railway Game* (Vol. 5). McGill-Queen's Press-MQUP.
- Mastrangelo, C. M., Olson, K. A., & Summers, D. M. (2021). A risk-based approach to forecasting component obsolescence. *MICROELECTRONICS RELIABILITY*, 127. doi: 10.1016/j.microrel.2021.114330.
- Megala, N., & Rajendran, C. (2013). An improved ant-colony algorithm for the grouping of machine-cells and part-families in cellular manufacturing systems. *International Journal of Operational Research*, 17(3), 345-373.
- Mehmood, A., Noor, M. F., Upadhyay, S., Hasan, F., & Ashraf, M. (2015). Part family formation using skip moves and lazy machines in a reconfigurable manufacturing system. *International Journal of Modelling in Operations Management*, 5(3-4), 196-208.
- Meng, X., Thornberg, B., & Olsson, L. (2012). Component obsolescence management model for long life cycle embedded system. Dans *48th IEEE Systems Readiness Technology Conference, AUTOTESTCON 2012, September 10, 2012 - September 13, 2012* (pp. 19-24). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. doi: 10.1109/AUTEST.2012.6334547.
- Meng, X., Thornberg, B., & Olsson, L. (2014). Strategic proactive obsolescence management model. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 4(6), 1099-1108. doi: 10.1109/TCPMT.2014.2316212.

- Meyer, A., Pretorius, L., & Pretorius, J. (2004). A model to manage electronic component obsolescence for complex or long life systems. Dans *2004 IEEE International Engineering Management Conference (IEEE Cat. No. 04CH37574)* (Vol. 3, pp. 1303-1309). IEEE.
- Meyer, P., & Bigaret, S. (2012). Diviz: A software for modeling, processing and sharing algorithmic workflows in MCDA. *Intelligent decision technologies*, 6(4), 283-296.
- Mojahed, A., Bettencourt-Silva, J. H., Wang, W., & de la Iglesia, B. (2015). Applying clustering analysis to heterogeneous data using similarity matrix fusion (smf). Dans *International workshop on machine learning and data mining in pattern recognition* (pp. 251-265). Springer.
- Mokraoui, S., Costa-Afonso, R., Besbes, M., Zolghadri, M., & Baron, C. (2025). Environmental Impact Characterization of Obsolescence Remediation Solutions in Long-Life Product. Dans *IFIP International Conference on Product Lifecycle Management* (pp. 438-448). Springer.
- Moore, G. (2011). Moore's law: made real by Intel Innovations. Repéré le July 26th, 2024 à <https://www.intel.com/content/www/us/en/history/museum-gordon-moore-law.html>
- Nelson, R. S., III, & Sandborn, P. (2012). Strategic management of component obsolescence using constraint-driven design refresh planning. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 6(2), 99-120.
- Nilchiani, R. R., Caddell, J. D., & Taramsari, H. B. (2025). The Extended Technology Readiness Level (eTRL): From Deployment to Obsolescence. *IEEE Open Journal of Systems Engineering*, 3, 1-9. doi: 10.1109/OJSE.2025.3527288
- Nunes, I. C., Kohlbeck, E., Beuren, F. H., Fagundes, A. B., & Pereira, D. (2021). Life cycle analysis of electronic products for a product-service system. *Journal of Cleaner Production*, 314. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127926
- Nunkaew, W., & Phruksaphanrat, B. (2014). Lexicographic fuzzy multi-objective model for minimisation of exceptional and void elements in manufacturing cell formation. *International Journal of Production Research*, 52(5), 1419-1442. doi: 10.1080/00207543.2013.843801.
- Padayachee, J., & Bright, G. (2016). A multi-period group technology method for dynamic cellular manufacturing systems. *South African Journal of Industrial Engineering*, 27(4), 90-100. doi: 10.7166/27-4-1524. Repéré à <http://dx.doi.org/10.7166/27-4-1524>
- Park, S., Seo, G., Park, Y., Kim, E. J., Lee, H., Lee, M., & Jakovljevic, M. (2025). Evaluation of Medical Device Aging and Replacement Decisions within Hospital Environments:

- A User-Centered Approach. *RISK MANAGEMENT AND HEALTHCARE POLICY*, 18, 2201-2215. doi: 10.2147/RMHP.S478245
- Pecht, M. G., & Das, D. (2000). Electronic part life cycle. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 23(1), 190-192. doi: 10.1109/6144.833060
- Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. *Journal of management information systems*, 24(3), 45-77.
- Pillai, V. M., & Subbarao, K. (2008). A robust cellular manufacturing system design for dynamic part population using a genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 46(18), 5191-5210. doi: 10.1080/00207540701332658
- Pingle, P. (2015). *Selection of obsolescence resolution strategy based on a multi criteria decision model*.
- Pobiak, T. G., Mazzuchi, T. A., & Sarkani, S. (2014). Creating a proactive obsolescence management system framework through the systems engineering continuum. *Systems Engineering*, 17(2), 125-139. doi: 10.1002/sys.21258
- Porter, Z. (1998). An Economic Method for Evaluating Component Obsolescence Solutions. *Boeing Corporation*.
- Prabhakar, V. J., & Sandborn, P. (2012). A part Total cost of Ownership Model for long life Cycle Electronic Systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 25(4-5), 384-397. doi: 10.1080/0951192X.2010.531293.
- Prabhakar, V. J., Sandborn, P., & Asme. (2012). *A MODEL FOR MAKING PART SOURCING DECISIONS FOR LONG LIFE CYCLE PRODUCTS*. New York: Amer Soc Mechanical Engineers.
- Prasad, D., & Jayswal, S. C. (2019). Assessment of a reconfigurable manufacturing system. *Benchmarking*. doi: 10.1108/BIJ-06-2018-0147
- QTEC (Producteur). (2006). Approximately 3% of the global pool of electronic components goes obsolete every month. *Tech. Rep*.
- Redling, T. J. (2004). Considerations for upgrading aging military avionics systems with state-of-the-art technology. Dans *The 23rd Digital Avionics Systems Conference (IEEE Cat. No. 04CH37576)* (Vol. 2, pp. 7. D. 1-7.1). IEEE.
- Reimert, W. (2020). *Obsolescence management strategies at Thales Hengelo* (University of Twente).

- Ren, Q., Yan, C., Zou, F., Xing, Y., Wang, H., & Zhang, Y. (2025). Real-Time Monitoring of On-Board Unit Status in Highway Electronic Toll Collection Systems Using Graphsage-Based Heterogeneous Graph Learning. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 37(6-8), e70056 (70020 pp.). doi: 10.1002/cpe.70056.
- Rojo, F. J. R., Roy, R., Shehab, E., & Cheruvu, K. (2012). A study on obsolescence resolution profiles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B (Journal of Engineering Manufacture)*, 226(1), 167-177. doi: 10.1177/0954405411407565. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1177/0954405411407565>
- Rojo, F. J. R., Roy, R., Shehab, E., Cheruvu, K., & Mason, P. (2012). A cost estimating framework for electronic, electrical and electromechanical (EEE) components obsolescence within the use-oriented product-service systems contracts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B (Journal of Engineering Manufacture)*, 226(1), 154-166. doi: 10.1177/0954405411406774. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1177/0954405411406774>
- Rojo, F. R., Baguley, P., Shaikh, N., Roy, R., & Kelly, S. (2012). TOMCAT: An Obsolescence Management Capability Assessment Framework. Dans *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 364, pp. 012098). IOP Publishing.
- Rojo, F. J., Roy, R., & Kelly, S. (2012a). Obsolescence risk assessment process best practice. Dans *Journal of Physics: Conference Series* (1 éd., Vol. 364). Institute of Physics Publishing. doi: 10.1088/1742-6596/364/1/012095
- Roy, B. (1990). The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. Dans *Readings in multiple criteria decision aid* (pp. 155-183). Springer.
- Roy, N., & Komma, V. (2014). Cellular manufacturing through composite part formation: a genetic algorithm approach. Dans *International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Bali, Indonesia, January* (pp. 7-9).
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process* Mcgraw Hill, New York. *Agricultural Economics Review*, 70.
- Sabbaghi, M., & Behdad, S. (2017). Environmental Evaluation of Product Design Alternatives: The Role of Consumer's Repair Behavior and Deterioration of Critical Components. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 139(8). doi: 10.1115/1.4036777.
- Saha, S., Basu, H., Singh, S., Singhal, R. K., & Pimple, M. V. (2025). Synthesis of carbon based hybrid material for extraction of hazardous metals (Pb, Cr) from E-waste. *DIAMOND AND RELATED MATERIALS*, 153. doi: 10.1016/j.diamond.2025.112068.

- Sandborn, P. (2007). Designing for technology obsolescence management. Dans *IIE Annual Conference and Expo 2007 - Industrial Engineering's Critical Role in a Flat World - Conference Proceedings* (pp. 1684-1689).
- Sandborn, P. (2008). Strategic management of DMSMS in systems. *DSP Journal*, 24-30.
- Sandborn, P. (2013). Design for obsolescence risk management. Dans *2nd International Through-Life Engineering Services Conference, TESConf 2013, November 5, 2013 - November 6, 2013* (Vol. 11, pp. 15-22). Elsevier. doi: 10.1016/j.procir.2013.07.073.
- Sandborn, P. (2017). Forecasting technology and part obsolescence. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(13), 2251-2260. doi: 10.1177/0954405415598923. Repéré à <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85032452730&doi=10.1177%2f0954405415598923&partnerID=40&md5=ab64294121181ff780eb27c412be4045>
- Sandborn, P. A. (2007). Software obsolescence - Complicating the part and technology obsolescence management problem. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 30(4), 886-888. doi: 10.1109/TCAPT.2007.910918.
- Sandborn, P. A., Herald, T. E., Jr., Houston, J., & Singh, P. (2003). Optimum technology insertion into systems based on the assessment of viability. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 26(4), 734-738. doi: 10.1109/TCAPT.2003.820984.
- Saraç, T., & Ozcelik, F. (2012). A genetic algorithm with proper parameters for manufacturing cell formation problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(4), 1047-1061. doi: 10.1007/s10845-010-0446-8. Repéré à <https://doi.org/10.1007/s10845-010-0446-8>
- Schumacher, K. A., Schumacher, T., & Agbemabiese, L. (2014). Quantification and probabilistic modeling of CRT obsolescence for the State of Delaware. *Waste Management*, 34(11), 2321-2326. doi: 10.1016/j.wasman.2014.07.011.
- Schumm, J. R., Ralston, P. M., & Schwieterman, M. A. (2024). The challenges of supply side obsolescence: Obsolescence procurement's past, present, and future. *TRANSPORTATION JOURNAL*, 63(1), 7-23. doi: 10.1002/tjo3.12005.
- Seuren, T., Tan, T., Vermeulen, B., Rosierse, R., Marine, R., Draijer, J. W., & Navy, R. N. (2018). *From reactive to proactive obsolescence management* (Eindhoven University Eindhoven, The Netherlands).
- Shaw, W., Speyerer, F., & Sandborn, P. (2010). Diminishing manufacturing sources and material shortages (DMSMS), non-recurring engineering (NRE) cost metric update. *Defense Microelectronics Activity*.

- Shi, Z., & Liu, S. (2020). Optimal inventory control and design refresh selection in managing part obsolescence. *European Journal of Operational Research*, 287(1), 133-144. doi: 10.1016/j.ejor.2020.04.038
- Shivankar, S. D., & Deivanathan, D. (2025). Product design change propagation analysis in a manufacturing environment with machine learning. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY*, 136(1), 433-446. doi: 10.1007/s00170-024-13877-1
- Shokrian, M., High, K. A., & Sheffert, Z. (2015). Screening of process alternatives based on sustainability metrics: comparison of two decision-making approaches. *International Journal of Sustainable Engineering*, 8(1), 26-39.
- Sierra-Fontalvo, L., Ruiz-Pastor, L., Gonzalez-Quiroga, A., & Mesa, J. A. (2024). Decoding product obsolescence: A taxonomic approach from product design attributes. *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION*, 475, 143635. doi: 10.1016/j.jclepro.2024.143635. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143635>
- Singh, P., & Sandborn, P. (2006). Obsolescence driven design refresh planning for sustainment-dominated systems. *Engineering Economist*, 51(2), 115-139. doi: 10.1080/00137910600695643.
- Singh, R. K., Murty, H. R., Gupta, S. K., & Dikshit, A. K. (2009). An overview of sustainability assessment methodologies. *Ecological indicators*, 9(2), 189-212.
- Staehr, E. R., Stevik, T. K., & Houck, L. D. (2025). Adaptability in the Building Process: A Multifaceted Perspective Across the Life Cycle of a Building. *BUILDINGS*, 15(7). doi: 10.3390/buildings15071119.
- Susanto, S., Bhattacharya, A., & Al-Dabass, D. (2010). Fuzzy Clustering-Based Optimised Cell Formation Algorithm Considering Sequence of Operations, Alternative Routing and Part-Volume. Dans *2010 UkSim 12th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim 2010)*, 24-26 March 2010 (pp. 22-27). IEEE Computer Society. doi: 10.1109/UKSIM.2010.13
- Tiwari, R., Khedlekar, S., Tiwari, R. K., Kumar, L., & Khedlekar, U. K. (2024). Lifecycle product inventory optimization: a hybrid approach with Grey-Wolf and Ant-Colony methods. *Journal of Remanufacturing*, 14(2), 219-252. doi: 10.1007/s13243-024-00142-7
- Tomczykowski, W. (2001). DMSMS acquisition guidelines: Implementing parts obsolescence management contractual requirements (Rev. 3.0). *Sacramento, CA: Defense Microelectronics Activity*.

- Tomczykowski, W. J. (2003). A study on component obsolescence mitigation strategies and their impact on R&M. Dans *Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2003*. (pp. 332-338). IEEE.
- Torresen, J., & Lovland, T. A. (2007). Parts obsolescence challenges for the electronics industry. Dans *2007 IEEE Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems* (pp. 1-4). IEEE.
- Tsai, Y. C., & Chen, M. C. (2012) A fuzzy robust model to a project decision management for DMSMS problem. du volume): *Vol. 182-183. Applied Mechanics and Materials* (pp. 1372-1376).
- Wang, G.-x., Huang, S.-h., Shang, X.-w., Yan, Y., & Du, J.-j. (2016). Formation of part family for reconfigurable manufacturing systems considering bypassing moves and idle machines. *Journal of Manufacturing Systems, 41*, 120-129. à <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.08.009>
- Ward, M., & Osiyevskyy, O. (2025). Design-led innovation as a generative source of competitive advantage. *Business Horizons, 68*(5), 687-698. doi: 10.1016/j.bushor.2024.10.003.
- Werey, C., Le Gat, Y., Curt, C., Tourment, R., & Tacnet, J. M. (2018). Asset management for water and sewer networks, levees and mountain protection works: Sectorial developments and crossed perspectives. *Techniques - Sciences - Methodes, 113*(12), 161-185. doi: 10.1051/tsm/201812161.
- Werner-Lewandowska, K., Golinska-Dawson, P., & Mierzwiaak, R. (2025). Enablers and barriers in building the circular supply chain through remanufacturing-Grey DEMATEL approach. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION ECONOMICS, 284*. doi: 10.1016/j.ijpe.2025.109617
- Wilkinson, C. (2015). *Obsolescence and life cycle management for avionics*.
- Wilkinson, C., Wasson, J., Condra, L., Fink, J., Scheidt, C., Brennom, T., . . . Sagot, Y. (1999). Component obsolescence management for aerospace electronic equipment. Dans *Proceedings of 1999 Avionics Conference and Exhibition, 17-18 Nov. 1999* (pp. 14 pp.). ERA Technol.
- Wu, L., & Suzuki, S. (2015). Cell formation design with improved similarity coefficient method and decomposed mathematical model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 79*(5), 1335-1352. doi: 10.1007/s00170-015-6931-7.
- Xiao, Q., Shi, W., & Wang, J. (2025). The design of a sustainable closed-loop supply chain network optimisation considering the emergency response capability of manufacturers

under emergencies. *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH*, 63(15), 5723-5748. doi: 10.1080/00207543.2025.2461136.

Yali, A. L., Xiao Yu, G., Zee Sow, W., & Loo Jang, W. (2012). Comprehensive life cycle approach to obsolescence management. *DSTA Horizons*, 20-27.

Yan, Z., Wang, J., & Fan, J. (2014). Machine-cell and part-family formation in cellular manufacturing using a two-phase clustering algorithm. Dans *19th IFAC World Congress on International Federation of Automatic Control, IFAC 2014, August 24, 2014 - August 29, 2014* (Vol. 19, pp. 2605-2610). IFAC Secretariat.

Yin, R. K. (2013). *Case study research: Design and methods*. Sage publications.

Yin, X. F., Khoo, L. P., & Chong, Y. T. (2013). A fuzzy c-means based hybrid evolutionary approach to the clustering of supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 66(4), 768-780. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.09.025>.

Yuelin, S., & Willems, S. P. (2014). Modeling sourcing strategies to mitigate part obsolescence. *European Journal of Operational Research*, 236(2), 522-533. doi: 10.1016/j.ejor.2014.01.025. Repéré à <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2014.01.025>

Zaabar, I., Arango-Miranda, R., Beauregard, Y., & Paquet, M. (2021). A sustainable multicriteria decision framework for obsolescence resolution strategy selection. *Sustainability (Switzerland)*, 13(15). doi: 10.3390/su13158601

Zaabar, I., Beauregard, Y., & Paquet, M. (2016). The impact of parts obsolescence on organization's performances: a case study in the aeronautic industry. Conférence MOSIM 2016. Montréal- Canada

Zaabar, I., Beauregard, Y., & Paquet, M. (2017). Evaluation and validation of a maturity model in obsolescence management for increased performances. Dans *2017 International Annual Conference of the American Society for Engineering Management, ASEM 2017*.

Zaabar, I., Polotski, V., Bérard, L., El-Ouaqaf, B., Beauregard, Y., & Paquet, M. (2022). A two-phase part family formation model to optimize resource planning: a case study in the electronics industry. *Operational Research*, 22(4), 4441-4469. doi: 10.1007/s12351-021-00682-x.

Zabaikin, I. V., Lunkin, A. N., & Lunkin, D. A. (2022). Disposal of Mining Waste and its Impact on the Environment. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, 23(3), 7-14. doi: 10.12912/27197050/147142.

- Zheng, L., Nelson, R., Terpenny, J., & Sandborn, P. (2013). Ontology-based knowledge representation for obsolescence forecasting. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 13(1), 014501 (014508 pp.). doi: 10.1115/1.4023003.
- Zheng, L., Terpenny, J., & Sandborn, P. (2015). Design refresh planning models for managing obsolescence. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 47(12), 1407-1423. doi: 10.1080/0740817X.2014.999898.
- Ziemba, P. (2019). Towards strong sustainability management—A generalized PROSA method. *Sustainability*, 11(6), 1555.