



Titre: Vers une aviation circulaire : une approche QFD durable et floue
pour une prise de décision collaborative dans le désassemblage et
la remise à neuf
Title:

Auteur: Hermès Tang
Author:

Date: 2024

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Tang, H. (2024). Vers une aviation circulaire : une approche QFD durable et floue
pour une prise de décision collaborative dans le désassemblage et la remise à
neuf [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/59103/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/59103/>
PolyPublie URL:

Directeurs de
recherche: Samira Keivanpour
Advisors:

Programme: Maîtrise recherche en génie industriel
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Vers une aviation circulaire : une approche QFD durable et floue pour une prise de décision collaborative dans le désassemblage et la remise à neuf

HERMÈS TANG

Département de mathématiques et de génie industriel

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

Génie Industriel

Août 2024

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Vers une aviation circulaire : une approche QFD durable et floue pour une prise de décision collaborative dans le désassemblage et la remise à neuf

présenté par **Hermès TANG**

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

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

Jean-Marc FRAYRET, président

Samira KEIVANPOUR, membre et directrice de recherche

Abdelhak OULMANE, membre

DÉDICACE

Aux futurs ingénieurs pour un monde meilleur...

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers ma directrice, Prof. Keivanpour, pour m'avoir accordé l'opportunité de participer à ce projet. Votre patience, votre bienveillance, votre soutien et votre disponibilité ont été des piliers essentiels tout au long de notre collaboration. Je suis également reconnaissant pour vos orientations éclairées, vos commentaires constructifs et vos précieux conseils qui ont joué un rôle déterminant dans chaque étape du développement de ce projet. Votre expérience, les connaissances et les compétences acquises sous votre tutelle, constitueront des atouts essentiels pour mon parcours personnel et professionnel.

Je tiens également à remercier les programmes PIED de Polytechnique Montréal, RGPIN du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie au Canada (CRSNG), et MITACS pour leur soutien financier et les ressources nécessaires à la bonne réalisation de ce projet.

Enfin, mes remerciements vont également à ma sœur Agnès, pour sa compréhension pendant mes études, ma recherche et la rédaction de mon projet. Sans oublier mes meilleurs amis pour leurs encouragements sans faille tout au long de ce parcours. Enfin, je suis reconnaissant envers mes collègues du laboratoire PolyCircleX.0 et particulièrement Ashkan, pour leurs conseils, leur bonne humeur et leur générosité.

RÉSUMÉ

En raison des enjeux environnementaux, sociaux et économiques croissants, l'industrie aéronautique doit adopter des pratiques plus responsables en intégrant l'économie circulaire. Ce modèle économique et innovant vise à optimiser l'utilisation des ressources disponibles tout en réduisant la génération des déchets. Contrairement au modèle linéaire traditionnel, l'économie circulaire promeut la réutilisation, le recyclage, ou encore la remise à neuf des produits, des composants et des matériaux qui arrivent en fin de vie. La remise à neuf, communément appelée « remanufacturing » dans la littérature scientifique, restaure les produits en fin de vie à un état équivalent à celui d'origine. Cependant, il s'agit d'une pratique encore peu exploitée dans l'industrie aéronautique. Le développement du remanufacturing dans ce domaine présente un véritable défi, car il implique la combinaison de plusieurs activités dans un processus complexe impliquant de multiples parties prenantes. De plus, les avions actuels ne sont pas spécifiquement conçus et optimisés pour le remanufacturing, soulignant l'importance d'adopter une conception adéquate tout en incluant des pratiques durables.

Pour tenter de répondre à cette lacune, ce mémoire est composé de deux articles principaux. Le premier article vise, dans un contexte d'économie circulaire, à développer une nouvelle approche QFD (Fuzzy Sustainable QFD) afin de prioriser les critères facilitant le désassemblage, qu'ils soient de nature technique, environnemental ou social. Dans cette approche, celle-ci intègre la fonction triangulaire de la logique floue afin de considérer les incertitudes inhérentes aux décisions des concepteurs. La première approche Fuzzy Sustainable QFD s'appuie également sur la catégorisation des parties prenantes pour une meilleure pondération des besoins. Enfin, une étude de cas portant sur un ordinateur portable illustre l'application de cette méthodologie. Ainsi, l'objectif de cet article est de développer un outil d'aide à la décision efficace pour optimiser la séparation des composants des produits en fin de vie tout en tenant compte des besoins des parties prenantes.

Améliorer les opérations de désassemblage signifie également améliorer l'efficacité des opérations de remanufacturing. C'est la raison pour laquelle le deuxième article s'inscrit dans la continuité du premier en approfondissant son étude sur l'ensemble du processus de remanufacturing et la remanufacturabilité des avions. Un état de l'art du remanufacturing a permis de déterminer les écarts existants entre le secteur aéronautique et les autres secteurs industriels comme l'automobile,

ou l'électronique. Un guide est proposé dans ce deuxième article pour aider les concepteurs à développer des avions spécialement conçus pour le remanufacturing. Cet article apporte également des modifications au Fuzzy Sustainable QFD développé dans le premier article. D'abord, le modèle est utilisé dans le cadre de remanufacturabilité des avions et intègre les critères spécifiques au remanufacturing. De plus, il permet une conception des avions plus fidèles à la réalité puisqu'il inclut la prise en compte des différentes expertises des parties prenantes. La fonction trapézoïdale, contrairement à la fonction triangulaire, permet une gestion plus efficace des incertitudes et une flexibilité accrue dans la prise de décision selon le degré de certitude des concepteurs et des parties prenantes. Cet article propose ainsi une amélioration par rapport au premier modèle Fuzzy Sustainable QFD puis illustre la méthodologie avec un exemple d'application pour améliorer la remanufacturabilité d'une aile d'un Airbus A350. Une approche qualitative vient compléter l'étude afin de valider la robustesse et la fiabilité du modèle final en comparant les rangs des différents critères à travers plusieurs méthodes de défuzzification.

Les résultats de cette recherche comprennent la promotion d'un guide pour aider les concepteurs à optimiser le processus de remanufacturing des avions, et la combinaison d'une nouvelle méthodologie avec l'intégration des critères de développement durable pour réduire l'empreinte environnementale et promouvoir l'aspect social. En somme, cette recherche propose des recommandations pour une industrie de l'aviation plus durable. Le remanufacturing demeurant une pratique encore peu développée dans l'industrie aéronautique, il existe d'une part un manque d'informations dans la littérature scientifique. D'autre part, le manque de données concrètes provenant du terrain, à la discrétion des industriels, a constitué un obstacle à la réalisation d'une étude de cas concrète et à l'obtention de résultats fiables. Enfin, le degré d'impact du modèle sur le remanufacturing, tant sur les aspects opérationnels, environnementaux que sociaux n'est pas encore mesuré. En revanche, une analyse de sensibilité réalisée dans le deuxième article, a confirmé la robustesse et la validité du modèle proposé, renforçant ainsi la confiance en l'outil Fuzzy Sustainable QFD développé dans cette recherche.

ABSTRACT

The increasing urgency of environmental, social, and economic concerns necessitates a shift towards responsible industrial practices, particularly in the aviation sector. Growing global awareness, regulatory pressures, and consumer demand for sustainable solutions drive this need. The circular economy, a model that optimizes resource use and minimizes waste, offers a promising alternative to the traditional linear model. While this model promotes reuse, recycling, and remanufacturing, the latter remains underutilized in the aviation industry due to the complexity of the process and the lack of aircraft designs optimized for remanufacturing.

This research addresses this gap through two articles. The first introduces new QFD approach (Fuzzy Sustainable QFD) to prioritize criteria facilitating disassembly, whether of a technical, environmental or social nature. This approach incorporates the triangular fuzzy numbers to take account of the uncertainties inherent in designers' decisions. The first Fuzzy Sustainable QFD approach also relies on the categorization of stakeholders for a better weighting of needs. Finally, a case study on laptops illustrates the application of this methodology. The aim of this article is to develop a practical and effective decision-support tool for optimizing the separation of components from end-of-life products, while taking into account the needs of stakeholders.

Improving disassembly operations also means enhancing the efficiency of remanufacturing processes. This is why the second article builds upon the first by taking a closer look at the entire remanufacturing process and the remanufacturability of aircraft. A review of the state of the art in remanufacturing identifies the differences between the aeronautical sector and other industrial sectors, such as the automotive and electronics industries. This second article proposes a guide to assist designers in developing aircraft specifically designed for remanufacturing. The article also introduces modifications to the Fuzzy Sustainable QFD developed in the first article. Firstly, the model is applied within the framework of aircraft remanufacturability and incorporates criteria specific to remanufacturing. Additionally, it enables aircraft design to be more aligned with reality by considering the diverse expertise of stakeholders. The trapezoidal fuzzy numbers, in contrast to the triangular fuzzy numbers, allows for more effective management of uncertainties and greater flexibility in decision-making, depending on the degree of certainty of designers and stakeholders. This article proposes an improvement on the initial Fuzzy Sustainable QFD model and illustrates the methodology with an example application to improve the remanufacturability of an Airbus

A350 wing. A qualitative approach complements the study, validating the robustness and reliability of the final model by comparing the ranks of the various criteria using several defuzzification methods.

This research contributes to the advancement of sustainable practices in the aviation industry by providing a guideline for optimized aircraft remanufacturing and integrating a novel methodology with sustainability criteria. The proposed approach can effectively reduce the environmental footprint and promote social responsibility. As remanufacturing remains an underdeveloped practice in the aviation industry and is not systematically adopted by all companies in the sector, there is a notable lack of information in the scientific literature. Additionally, the scarcity of concrete data from the field has been an obstacle to conducting a comprehensive case study and obtaining reliable results. The degree of impact of the model on remanufacturing, in terms of operational, environmental, and social aspects, has yet to be measured. Despite this limitation, the model's robustness and validity have been confirmed through sensitivity analysis, reinforcing confidence in the developed decision-making tool.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte	1
1.2 Plan de mémoire.....	3
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	4
2.1 Concept du remanufacturing	4
2.1.1 Origine et évolution du remanufacturing	4
2.1.2 Le remanufacturing dans le contexte aéronautique	7
2.2 Conception pour le remanufacturing.....	8
2.2.1 Mise hors service des avions	9
2.2.2 Désassemblage	9
2.2.3 Nettoyage	10
2.2.4 Inspection et tri.....	10
2.2.5 Réparation et reconditionnement	11
2.2.6 Test et certification.....	11
2.2.7 Impact du DfRem	12
2.3 Le QFD, un outil d'aide à la décision	13

2.3.1	Vers un outil plus durable	13
2.3.2	L'approche QFD traditionnelle	14
2.3.3	Intégration de la logique floue	15
2.3.4	Application des différentes méthodologies QFD dans le remanufacturing	15
2.4	Synthèse de la revue de littérature.....	17
CHAPITRE 3 ORGANISATION DU MÉMOIRE		21
3.1	Objectifs de recherche	21
3.2	Cheminement du projet	21
3.3	Contributions à la recherche.....	23
CHAPITRE 4 ARTICLE 1: DEVELOPING A NOVEL ECO-DESIGN TOOL FOR DISASSEMBLING A COMPLEX PRODUCT UNDER UNCERTAINTY		25
4.1	Introduction	25
4.2	Literature review	26
4.2.1	Design for disassembly and parameters related to circular economy	26
4.2.2	Quality Function Deployment as an eco-design tool	27
4.2.3	Fuzzy Sustainable QFD.....	27
4.2.4	Synthesis of literature review	28
4.3	Methodology	29
4.4	An illustrative example	30
4.5	Conclusion.....	31
CHAPITRE 5 ARTICLE 2: STAKEHOLDER-DRIVEN ECODESIGN FOR AEROSPACE REMANUFACTURING: A FUZZY-SUSTAINABLE QFD FRAMEWORK FOR MANAGING UNCERTAINTY		33
5.1	Introduction	33
5.2	Literature review	36

5.2.1	Remanufacturing aircraft.....	36
5.2.2	Design for remanufacturing	38
5.2.3	Quality Function Deployment.....	45
5.2.4	Summary and synthesis of the literature	50
5.3	A proposed approach.....	51
5.3.1	Process mapping.....	51
5.3.2	Design for remanufacturing guideline.....	54
5.3.3	Fuzzy Sustainable QFD methodology.....	56
5.4	Application	59
5.4.1	Background	59
5.4.2	Results	60
5.5	Discussion and managerial insights	66
5.6	Conclusion and future research	70
CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		72
6.1	Synthèse des travaux	72
6.2	Implication de la recherche	73
6.3	Limites.....	73
6.4	Recherches futures	74
RÉFÉRENCES.....		75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Synthèse de revue de littérature.....	19
Table 4.1 Parameters' comparison between DfD or DfRem case studies	28
Table 5.1 DfRem for aircraft guideline	55
Table 5.2 Importance degree of each requirement according to stakeholders	61
Table 5.3 Average weight for each requirement	62
Table 5.4 Degree of relationship between requirements and product features and sustainable criteria	64
Table 5.5 Ranks with different fuzzy sets	66
Table 5.6 Ranks by different defuzzification methods	68

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Tendances et lacunes identifiées dans la revue de littérature	20
Figure 3.1 Cheminement du projet.....	22
Figure 3.2 Éléments clés de l'article 1.....	23
Figure 3.3 Éléments clés de l'article 2.....	23
Figure 4.1 FS-QFD approach for DfD	29
Figure 4.2 A FS-QFD approach applied to a laptop DfD case study.....	31
Figure 5.1 Three EOL strategies for closing the linear manufacturing chain	37
Figure 5.2 Contributions of the proposed model.....	51
Figure 5.3 General process of remanufacturing in aeronautical industry	52
Figure 5.4 Detailed process of remanufacturing	53
Figure 5.5 Detailed process of decommissioning and disassembly	53
Figure 5.6 Detailed process of design phase for remanufacturing.....	53
Figure 5.7 Trapezoidal membership function	56
Figure 5.8 Linguistic variables and their corresponding quadruplet of numbers.....	57
Figure 5.9 Modified fuzzy sets.....	67
Figure 5.10 Ranks by different defuzzification methods	69

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AFRA	Aircraft Fleet Recycling Association
AHP	Analytic Hierarchy Process
APUs	Auxiliary Power Units
BIPAD	Best Industry Practices for Aircraft Decommissioning
CI	Centroid Point
CNC	Computer Numerical Control
COG	Center of gravity
DfD	Design for disassembly
DfRem	Design for remanufacturing
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EoL	End-of-Life
FAA	Federal Aviation Administration
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
FS-QFD	Fuzzy Sustainable Quality Function Deployment
HoQ	House of Quality
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
LIFE	L'Instrument Financier pour l'Environnement
MAP	Mean position, Area, Perimeter
OAT	One-At-a-Time
ONU	Organisation des Nations Unies
PAMELA	Process for Advanced Management End-of-Life Aircraft
PMM	Proportionate Maxima Method

PSS	Product-Services-System
QFD	Quality Function Deployment
QFD-CE	Quality Function Deployment considering Circular Economy and Expectations of Customers
RATs	Ram Air Turbines
SCGM	Simple center of gravity method
SDM	Signed Distance Method
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats
WEEE	Waste from Electrical and Electronic Equipment

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Les enjeux environnementaux ont commencé à être reconnus dans les années 1970, mettant en lumière l'impact des activités humaines sur les ressources naturelles. La conférence des Nations Unies à Stockholm en 1972, a éveillé ces questions environnementales et a souligné la nécessité de protéger l'environnement [1]. Cependant, il a fallu attendre 2015 pour définir les 17 objectifs du développement durable, parmi lesquels figure le neuvième objectif : Industrie, Innovation et Infrastructure [2]. Ce dernier vise à moderniser les infrastructures pour les rendre plus durables, en favorisant une utilisation plus rationnelle des ressources et en recourant davantage aux technologies et activités industrielles propres et respectueuses de l'environnement. Il encourage également la recherche scientifique et l'innovation pour améliorer les capacités technologiques des différents secteurs industriels [3].

Malgré un désir d'un monde plus durable, le secteur de l'industrie manufacturière représente près de 20% des émissions mondiales de CO₂, et au Canada, cette part s'élève à 14% à l'échelle nationale [4]. L'économie circulaire s'avère être une philosophie à adopter dans les prochaines années en raison de ses bienfaits environnementaux, économiques et sociaux. Cette approche cherche à optimiser l'utilisation des ressources disponibles et à réduire la production des déchets en prolongeant la durée de vie des produits à travers la réutilisation, le recyclage ou encore le remanufacturing. L'objectif principal de l'économie circulaire est de maintenir aussi longtemps que possible la valeur des produits tout au long de leur cycle de vie en réduisant l'impact environnemental et les émissions de CO₂. Ainsi, le remanufacturing en réponse du neuvième objectif de développement durable, est une pratique émergente associée à l'économie circulaire. Il consiste à remettre à neuf des produits en fin de vie en suivant une série d'activité déterminée comme le désassemblage, le nettoyage ou encore les réparations [5]. En restaurant des composants usagés à un état équivalent à celui d'origine, le besoin de nouvelles ressources et la quantité de déchets générés sont amortis contribuant à la conservation de l'environnement et une utilisation plus durable des matériaux et des produits. Ce processus utilise moins d'énergie que la production de nouveaux produits et les produits remanufacturés sont souvent moins coûteux et plus fiables, offrant des économies aux consommateurs et aux manufacturiers. De plus, le remanufacturing favorise la création d'emplois et stimule l'innovation et la compétitivité en améliorant la

conception et la performance des produits. En somme, le remanufacturing s'intègre parfaitement au modèle d'économie circulaire, un modèle de développement durable qui équilibre les besoins économiques, environnementaux et sociaux [6].

Bien que le remanufacturing soit largement adopté dans des secteurs comme l'automobile ou l'électronique, il reste sous-exploité dans l'industrie aéronautique. Cette sous-utilisation est d'autant plus préoccupante que l'aviation est confrontée à des défis environnementaux majeurs, notamment la gestion des avions en fin de vie stationnés dans des déserts. Ces avions laissés à l'abandon, représentent non seulement un gaspillage de ressources précieuses, mais aussi une source d'impact environnemental négatif. Les matériaux et les composants ayant encore une valeur résiduelle pourraient être remis à neuf, tandis que les déchets ne sont pas toujours traités de manière adéquate. Ce manque de gestion efficace des avions en fin de vie contribue à une empreinte écologique négative pour l'industrie aéronautique, rendant urgente l'adoption de pratiques plus durables. Introduire le remanufacturing dans l'industrie aéronautique permettrait ainsi de réduire la dépendance aux matières premières coûteuses et souvent limitées, de diminuer les coûts en réutilisant les composants existants remis à neuf et de favoriser une culture de durabilité et de responsabilité environnementale [7]. Actuellement, les processus traditionnels de fabrication se concentrent sur la production et ne tiennent pas compte de la réutilisation ou de la remise à neuf des composants en fin de vie. Une majorité des avions ne sont donc pas spécifiquement conçus pour le remanufacturing ce qui soulève la nécessité de développer des outils de conception et d'aide à la décision pour aider les concepteurs à intégrer efficacement des critères de remanufacturabilité et de développement durable.

D'une part, il est important de reconnaître que les avions, en raison de leur complexité et de leurs exigences en matière de sécurité, de fiabilité et de performance, requièrent une attention particulière dès la phase de conception. La remanufacturabilité, un terme désignant la capacité d'un produit à être facilement remanufacturé, est un concept clé pour améliorer la conception des avions. Elle vise à améliorer la manière dont les avions sont conçus afin de faciliter les activités de remanufacturing pour qu'elles soient plus efficaces et plus économiques. Une conception axée sur la remanufacturabilité permet d'assurer que les composants aéronautiques peuvent être désassemblés, réparés, ou remplacés avec un minimum d'effort et de ressources, ce qui réduit les coûts et les impacts environnementaux tout en augmentant la durée de vie des avions. D'autre part, l'intégration des critères de durabilité ne peut être négligée dans la conception car cette dernière

garantit que les activités de remanufacturing sont non seulement efficaces, mais aussi respectueux de l'environnement. Le déploiement de la fonction qualité (Quality Function Deployment – QFD) peut jouer un rôle déterminant dans la remanufacturabilité des avions. Dans ce contexte, cet outil s'avère utile dans la mesure où l'approche QFD permet de traduire les exigences des parties prenantes de l'industrie aéronautique en caractéristiques techniques à prioriser et développer dans la phase de conception [8]. En intégrant des critères de remanufacturabilité et de durabilité dans l'approche QFD, les concepteurs peuvent développer des avions qui répondent aux exigences complexes du secteur et qui favorisent des activités de remanufacturing plus durables.

Mais encore, cette approche est particulièrement reconnue pour sa docilité et sa capacité à adapter sa méthodologie selon les cas d'études rencontrés. Dans ce projet en l'occurrence, l'intégration de la logique floue dans l'approche QFD semble être une solution plausible en raison de son habileté à gérer les incertitudes associées à la prise de décision des concepteurs et au remanufacturing telles que la demande fluctuante, les résultats imprévisibles, la qualité des composants en fin de vie et leur valeur résiduelle. La logique floue, notamment par l'utilisation de la fonction trapézoïdale, offre une flexibilité accrue pour modéliser des variables en tenant compte du degré de certitude sur la conception des avions. Elle permet de mieux capturer et traiter les incertitudes associées au remanufacturing [9]. Cette technique fortifie la crédibilité d'une conception optimisée pour le remanufacturing et s'adapte aux exigences changeantes de l'industrie aéronautique. En combinant l'approche QFD et la logique floue, l'objectif de cette recherche est de développer une approche robuste et flexible qui répond efficacement aux problématiques complexes du remanufacturing dans l'aviation pour une industrie plus durable.

1.2 Plan de mémoire

Le plan de ce mémoire est structuré de la manière suivante. Le CHAPITRE 2 consiste en une revue de littérature, dressant un état de l'art des travaux existants sur le remanufacturing dans différents secteurs industriels. Il analyse ensuite les différentes approches QFD utilisées dans plusieurs études. Le CHAPITRE 3 présente les objectifs de recherche et les contributions des deux articles qui constituent le mémoire. Les CHAPITRE 4 et CHAPITRE 5 exposent ces deux articles. Enfin, le CHAPITRE 6 résume les principales conclusions de cette recherche et propose des recommandations pour des futures études. Il offre également une perspective critique sur les défis rencontrés et les opportunités identifiées au cours de cette recherche.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

L'objectif de ce chapitre est de dresser un état de l'art du remanufacturing en commençant par définir son concept puis de présenter des exemples provenant de divers secteurs industriels. Ensuite, il propose une analyse des attributs techniques essentiels favorisant le remanufacturing et les critères de développement durable clés associés à cette pratique. Il examine également les différentes approches QFD utilisées dans des études antérieures. Enfin, le chapitre s'achève par une synthèse globale dans l'intention de cerner les motivations de cette recherche.

2.1 Concept du remanufacturing

2.1.1 Origine et évolution du remanufacturing

L'effervescence des préoccupations environnementales a incité l'ONU à fixer 17 objectifs de développement durable, parmi lesquels figure l'objectif 9 axé sur l'industrie, l'innovation et les infrastructures [2]. Cet objectif vise à promouvoir une utilisation plus modérée des ressources en favorisant l'adoption des technologies et des activités industrielles durables [3]. Cette orientation souligne la nécessité de repenser des modèles économiques alternatifs pour assurer la durabilité à long terme. L'émergence de l'économie circulaire est une réponse à ces injonctions et est motivée par plusieurs facteurs, notamment les préoccupations environnementales, les changements climatiques, la raréfaction des ressources naturelles et les défis liés à la gestion déchets [10]. L'économie circulaire gagne en popularité grâce à l'adoption de nouvelles politiques environnementales et l'engagement accru des entreprises et des gouvernements en faveur des pratiques plus durables [11].

L'économie circulaire représente un concept économique et environnemental qui promeut une utilisation efficace des ressources en minimisant les déchets et en prolongeant la durée de vie des produits. La gestion des produits en fin de vie est un aspect clé de l'économie circulaire. En effet, plutôt que de les considérer comme des déchets, ce concept encourage la réintégration des composants d'un produit ayant une valeur résiduelle suffisante dans la chaîne de cycle de vie du produit. Contrairement au modèle linéaire traditionnel qui consiste à extraire, produire puis jeter, le concept d'économie circulaire aspire à imiter un cycle en boucle fermée et naturel où les déchets deviennent des ressources [12].

Dans ce contexte, trois pratiques sont envisagées pour la réintégration des composants : la réutilisation, le recyclage et le remanufacturing. La réutilisation est une pratique non-destructive consistant à utiliser les composants plusieurs fois pour le même usage sans modification [13]. Cette pratique présente plusieurs avantages environnementaux et économiques. Elle réduit la consommation d'énergie et des émissions associées par rapport à la fabrication de nouveaux produits et réalise des économies en évitant les coûts liés aux matières premières [14]. La réutilisation favorise également des initiatives durables telles que les échanges ou les ventes de seconde main [15]. En revanche, le recyclage implique le traitement des matériaux usagés et la transformation des produits en fin de vie en ressources réutilisables [16]. Bien que le recyclage soit bénéfique car il restreint la demande de ressources vierges, il comporte des défis liés à la recyclabilité des matériaux et à leur capacité à retrouver leurs propriétés d'origine [17]. De plus, il requiert une quantité d'énergie supplémentaire pour transformer les produits usagés en nouvelles ressources [18].

Contrairement à la réutilisation qui ne comprend pas de réparations ou de remises à neuf, le remanufacturing comprend le désassemblage, le nettoyage, les réparations et le réassemblage des composants ce qui permet la restauration des produits à un état équivalent à celui d'origine [19]. Le remanufacturing, à la différence des deux autres pratiques, prolonge la durée de vie des produits et réduit la production des déchets tout en assurant un produit remis à neuf hautement fiable [20]. L'avènement de cette pratique contribue ainsi à la durabilité en minimisant l'élimination des déchets et la limitation des émissions, et favorise la création de nouveaux emplois et de nouvelles compétences et connaissances. Enfin, le remanufacturing ouvre la voie à de nouvelles opportunités commerciales en concevant de nouveaux produits spécifiquement adaptés à cette pratique [6].

Le remanufacturing est un domaine en pleine croissance dans le secteur de l'automobile où plusieurs composants clés ont été ciblés pour améliorer leur remanufacturabilité. Zhang et al. [21] ont identifié les principaux défis liés au remanufacturing des moteurs et de leurs accessoires, notamment la gestion des flux, les relations entre les parties prenantes, les conduites à adopter et la standardisation des processus. En mettant en lumière ces défis, les auteurs ont suggéré les stratégies à suivre pour le bon développement du remanufacturing des moteurs automobiles. José et al. [22], quant à eux, ont cherché à optimiser la conception des blocs moteurs, des vilebrequins et des arbres à came pour faciliter leur inspection et leur remise à neuf, et par conséquent la fluidification du processus de remanufacturing. Dans le cadre du remanufacturing automobile,

d'autres études ont montré les avantages durables, tant sur le plan environnemental qu'économique. Enfin, le concept du remanufacturing commencent principalement à bourgeonner dans les pays en voie de développement en Asie du sud-est comme le Sri Lanka ou encore la Malaisie [23] et d'autres pays comme en Chine [21] ou au Japon [24].

Parallèlement, le remanufacturing est également répandu dans le domaine des composants électriques et électroniques. Wang et al. [25] ont mis en évidence l'importance de gérer efficacement les flux des déchets électriques et électroniques en raison des technologies de plus en plus innovantes et variées. Cette révolution technologique engendre une surconsommation des ressources, un impact environnemental préoccupant et des risques pour la population en raison des matières dangereuses et rares contenus dans ces déchets électriques et électroniques [26], [27]. Au Canada, où le remanufacturing des composants électriques et électroniques est encore peu développé et limité, contrairement en Europe où la législation WEEE encadre cette problématique [28]. Habib et al. [29] ont constaté qu'au Canada, la production annuelle totale de déchets électriques et électroniques est estimée à 954 kilotonnes en 2020. Cette quantification fournit des informations précieuses aux décideurs politiques pour fixer des objectifs en matière de réduction des déchets et identifier le potentiel de circularité de ces ressources. Shahbazi et al. [30] ont mené une étude sur l'automatisation de la chaîne de remanufacturing en interrogeant des entreprises, dont une spécialisée dans les composants électroniques pour véhicules et une autre dans les photocopieuses. Cette étude a mis en évidence l'impact d'une conception adéquate des produits sur les activités du remanufacturing et sa pertinence dans le contexte de l'économie circulaire. Osibanjo et Nnorom [31] et Wahjudi et al. [32] ont étudié la gestion des téléphones mobiles en fin de vie, respectivement au Nigeria et en Indonésie, en analysant tout d'abord les pratiques économiques et environnementales dans ces pays. Ces analyses ont donné lieu à des recommandations pour faciliter la gestion des déchets des téléphones mobiles en fin de vie. D'Adamo et Rosa [33], à travers une étude de cas sur les dispositifs médicaux, ont pu identifier les facteurs critiques du remanufacturing à l'aide d'une analyse SWOT. Ils ont déduit que la force du remanufacturing réside dans son potentiel économique et lucratif pour les futures années, mais cela représente également une faiblesse en raison des coûts élevés des opérations. Son opportunité est donc de concevoir une solution durable tout en se confrontant à la menace qui est incarnée par la complexité des opérations. Enfin, Mann et al. [34] ont exploré les différentes tactiques de conception pour faciliter le remanufacturing de composants électroniques des ordinateurs portables. Quant à Low et Ng [35],

ils ont proposé un cadre méthodologique expliquant les étapes de conception des ordinateurs portables pour le marché cambodgien et ont mis en avant la faisabilité économique malgré les incertitudes.

Le remanufacturing est finalement un concept émergent qui touche plusieurs secteurs. Cependant, il convient d'analyser la place du secteur aéronautique dans le remanufacturing en révélant les défis, les opportunités et les pratiques actuelles.

2.1.2 Le remanufacturing dans le contexte aéronautique

L'expansion du nombre de passager aérien, atteignant les 4.56 milliards annuels en 2019 [36], a entraîné une demande croissante de production d'avions. Cependant, cela s'accompagne d'émissions accrues de gaz à effet de serre, d'une utilisation abusive des ressources primaires et de la raréfaction des matériaux vierges [37]. De plus, avec l'atteinte de la fin de la durée de vie des avions, la gestion de ces moyens de locomotion s'avère un véritable défi nécessitant des solutions innovantes pour rendre ce secteur plus circulaire [38]. Seuls les propriétaires ou les compagnies aériennes décident qu'un avion a atteint sa fin de vie opérationnelle lorsque les dépenses liées à la maintenance, la mise à niveau pour se conformer à de nouvelles réglementations deviennent élevées, ou que certains composants deviennent obsolètes [39]. Le nombre d'avions retirés de la flotte aérienne augmente chaque année, et l'abandon de ces engins volants dans les décharges ne semblent pas être une solution durable. C'est la raison pour laquelle Airbus dans les années 2000 a lancé le projet PAMELA avec le support de LIFE, un fonds de l'Union Européenne porteur de projets. Le projet PAMELA consistait à développer une meilleure approche pour la gestion des avions en fin de vie et les études ont démontré que 85% des composants de l'avion avaient encore une certaine valeur résiduelle et pouvaient donc être réutilisés, recyclés ou remanufacturés. Ainsi, les avions possèdent de divers composants et matériaux qui peuvent être réintégrés dans la chaîne linéaire du cycle de vie du produit [20], [40].

La littérature existante offre plusieurs approches et études concernant la gestion durable des avions en fin de vie et le remanufacturing des composants aéronautiques. En raison d'un manque de gestion du cycle de vie des avions, Ribeiro et Gomes [41] ont proposé un cadre méthodologique et ont établi des stratégies durables pour déterminer la fin de vie adaptée des avions. Asmatulu et al. [42] ont étudié les avantages environnementaux du recyclage et de la réutilisation des composants d'avions avec des matériaux à faible consommation d'énergie. Quant à Zhao et al. [43], ils ont

évalué les performances économiques des différentes stratégies de fin de vie des avions. Hashemi et al. [44], dans la même volonté de déterminer les performances économiques, ont développé un modèle de programmation linéaire mixte pour maximiser les bénéfices en tenant compte des coûts de fabrication, de remanufacturing, de maintenance et de stockage des composants aéronautiques. D'autres études spécifiques à la remise à neuf des composants ont été menées. Par exemple, Chen et al. [45] ont exploré le revêtement laser pour la finition des surfaces en acier des trains d'atterrissage. La restauration des pales de turboréacteurs est également au centre des études menées par plusieurs auteurs. Certains ont suggéré la technique d'ajout de matières en raison de son potentiel alliant précision, efficacité et conservation de propriétés mécaniques [46], [47]. Liang et al. [48] ont mené des recherches sur les processus de remanufacturing hybride et ont évalué les effets du revêtement laser, l'usinage CNC et le laminage ultrasonore sur l'intégrité des surfaces des pales de turboréacteurs.

Ainsi, les avions en fin de vie conservent une valeur résiduelle suffisante permettant de préserver les matériaux, les ressources et de créer de la main d'œuvre nécessaire pour la production des avions remanufacturés. Le concept du remanufacturing des avions s'inscrit bien dans le cadre de l'économie circulaire dans la mesure où il réduit la demande en matières vierges et minimise la consommation de ressources [49]. En plus de ses bénéfices environnementaux, le processus de remanufacturing offre des avantages économiques et sociaux. Il contribue à la création d'emplois et au développement des compétences qui requièrent des techniques spécialisées et une expertise dans le remanufacturing. Cela renforce, non seulement, les opportunités d'emploi mais favorise également le développement d'une main-d'œuvre qualifiée, capable de gérer efficacement les opérations de remanufacturing [50]. Cependant, malgré un développement des techniques qui ont conduit à des avantages durables, Airbus et Boeing ont montré des limites dans la gestion des avions en fin de vie [51].

2.2 Conception pour le remanufacturing

Afin de promouvoir le remanufacturing, il convient de développer une conception appropriée des produits pour faciliter la réintégration des composants dans la chaîne de cycle de vie [31]. Et il n'est pas rare de constater que le DfRem est négligé dans la phase initiale de conception [52]. Néanmoins, en mettant en œuvre des tactiques pour optimiser le processus de remanufacturing et la conception des produits, il est possible d'améliorer l'efficacité, la qualité et les coûts de

production tout en atténuant les impacts environnementaux et économiques [53]. Le DfRem s'attache à garantir la remanufacturabilité du produit dès la phase de conception. Cela implique de discerner les paramètres de conception liés aux caractéristiques et aux fonctionnalités du produit, définis par des attributs techniques et des critères environnementaux et sociaux [54], [55], [56]. Pour améliorer la remanufacturabilité des produits, les paramètres de conception sont liés à la mise hors service des avions pour le cas de l'industrie aéronautique, le désassemblage, l'inspection et le tri, le nettoyage, les réparations et les phases de tests.

2.2.1 Mise hors service des avions

Les propriétaires d'avions ou les compagnies aériennes décident selon leur gré, le retrait des avions de leur flotte aérienne et enclenchent la phase de mise hors service. Caractérisant le début du processus de remanufacturing des avions, la phase de mise hors service doit être réalisée de manière efficace pour faciliter les tâches ultérieures. Cela implique le retrait de tous les fluides et substances dangereuses. De ce fait, pour améliorer la facilité de mise hors service, il serait avantageux d'avoir une architecture favorable au drainage des fluides et d'établir des protocoles de sécurité pour diminuer les risques de contamination [57].

2.2.2 Désassemblage

Le désassemblage consiste en une séparation des différents composants d'un produit. Posséder une compréhension approfondie des matériaux et de l'architecture des produits est déterminante pour améliorer le rendement du remanufacturing [54]. Pour cette étape du remanufacturing, les concepteurs mettent en place des stratégies pour faciliter le désassemblage. Tout d'abord, établir des séquences de désassemblage permet d'économiser du temps, de réduire les efforts de main-d'œuvre et de diminuer les coûts associés [58]. Combiné avec une compréhension de la géométrie et la position exacte des joints et des fixations grâce aux informations techniques, il est envisageable d'élaborer une conception favorable au désassemblage. Shu et Flowers [59], ainsi que Cruz Rios et al. [60], ont insisté sur la nécessité de réduire le nombre et la diversité des fixations et d'utiliser des fixations standard pour faciliter l'efficacité de désassemblage. Behrendt et al. [61] ont affirmé que le temps et l'effort de désassemblage dépendent du nombre et du type de fixations. Par conséquent, la forme structurelle est importante et ses composants doivent être conçus de manière hiérarchique afin de simplifier les séquences de désassemblage. En outre, pour améliorer les conditions de travail, il est essentiel d'optimiser l'accessibilité aux composants et aux fixations pour

réduire la pénibilité des opérations. Des procédures durables peuvent être mises en œuvre pour réduire l'impact environnemental et atténuer les risques de blessures, comme l'évitement des matériaux toxiques ou des formes dangereuses telles que des arêtes vives ou des surfaces rugueuses [61].

2.2.3 Nettoyage

La phase de nettoyage représente l'une des étapes les plus délicates du processus de remanufacturing en raison de ses opérations coûteuses et énergivores. Hammond et al. [62] ont mentionné des facteurs qui rendent le processus de nettoyage difficile, tels que les problèmes environnementaux, les débris excessifs, la taille des pièces et les matériaux utilisés. Tolio et al. [63] ont démontré l'impact du nettoyage sur la qualité des produits remanufacturés. En effet, l'étape de nettoyage simplifie la phase d'inspection pour détecter les fissures, les marques d'abrasion et l'usure. Une stratégie pour améliorer l'efficacité du nettoyage consiste à privilégier l'utilisation de surfaces lisses et à éviter les formes ou matériaux susceptibles de favoriser l'accumulation de saleté ou de résidus [64]. Par ailleurs, l'étape de nettoyage soulève des préoccupations environnementales et sanitaires, en raison des risques chimiques et toxiques associés aux solvants organiques, qui compromettent la sécurité des travailleurs et ont un impact environnemental négatif. Ainsi, il est essentiel de promouvoir la sécurité des travailleurs en améliorant l'accès aux composants et en veillant à ce que l'environnement de travail et l'ergonomie soient adaptés [59].

2.2.4 Inspection et tri

La phase d'inspection est décisive car elle permet une sélection des pièces devant être remises à neuf. Cela implique d'examiner les défaillances telles que l'usure, la corrosion, les fissures ou les déformations [65]. Par conséquent, disposer des informations telles que les propriétés des matériaux, les limites de charge, les tolérances et les ajustements est crucial pour faciliter l'inspection et le tri [66]. De plus, les zones de test ou de mesure des dimensions géométriques nécessitent des matériaux capables de résister à cette phase [40]. Dans l'industrie aéronautique régulée par une réglementation stricte, les inspections sont capitales et doivent être effectuées de façon méticuleuse pour assurer une planification adéquate des activités ultérieures. Amezcua et al. [67] ont attesté qu'une architecture appropriée permet de minimiser le temps d'inspection et de tri, réduisant ainsi la charge de travail et les coûts. Cela est particulièrement significatif dans le contexte de l'aviation, étant donné la grande taille et la complexité de la structure des avions. Pour

simplifier le processus de tri, il est avantageux de réduire le nombre total de composants, de diminuer la variété des composants et de privilégier les composants standard ou ceux qui remplissent des fonctions similaires, ou qui sont indubitablement différents [53], [63], [64].

2.2.5 Réparation et reconditionnement

En fonction de la valeur résiduelle restante et de l'ampleur des défauts, les composants peuvent exiger des réparations, qu'elles soient mineures ou majeures [44]. Plusieurs méthodes de réparation sont disponibles, notamment l'élimination des défauts de surface et de forme par des processus d'usinage soustractif, l'ajout de matériau par fabrication additive, la restauration des matériaux et de leurs propriétés, ainsi que la finition des surfaces. Par exemple, Rahito et al. [47] ont exploré le potentiel de la fabrication additive par dépôt de métal pour remettre à niveau les pales de turbine, mettant en avant les avantages à reconstituer les composants en n'ajoutant que la matière nécessaire. L'objectif de cette étape est de restaurer les fonctions d'origine des composants tout en restreignant le recours à des pièces interchangeables [63].

2.2.6 Test et certification

La phase de test, malgré les coûts, l'énergie et les ressources supplémentaires, sert à évaluer les performances et le potentiel du produit pour sa seconde vie. Cette étape revêt une importance particulière dans le secteur aéronautique en raison des marges d'erreur très faibles et des exigences de fiabilité [68]. L'industrie aéronautique est étroitement liée aux réglementations gouvernementales et internationales. Les avions doivent respecter les spécifications imposées par les grandes instances mondiales [33]. En fonction du lieu de production final, les avions doivent répondre aux spécifications imposées par l'EASA ou la FAA. Ces instances collaborent avec l'ICAO, une agence des Nations Unies chargée de développer des normes de l'aviation civile [41]. D'autres organisations influentes jouent également un rôle clé dans l'industrie aéronautique comme l'AFRA, une organisation à but non lucratif qui accrédite les manufacturiers pour leurs pratiques respectueuses de la sécurité au travail et de l'environnement. Une compagnie accréditée par l'AFRA garantit que sa gestion des avions en fin de vie suit des protocoles durables et stricts [69]. L'IATA fournit des documents pour toutes les parties prenantes, du concepteur aux compagnies aériennes, afin de les aider à instaurer des pratiques durables pour une meilleure gouvernance de l'industrie aéronautique. Par exemple, l'IATA a élaboré un document décrivant les pratiques durables à adopter pour la gestion des avions en fin de vie et tenant compte des aspects techniques,

environnementaux, économiques, sociaux et juridiques [70]. Pour mesurer l'impact environnemental par exemple, les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie sont considérées [71]. Ainsi, les grandes instances veillent à ce que des pratiques durables recommandées soient intégrées pour faciliter la certification des avions. De plus, dans l'industrie aéronautique mais aussi l'automobile ou encore l'électronique, les normes de gestion de la qualité, telles que l'ISO9100 et l'ISO14000, jouent un rôle essentiel car elles imposent une gestion structurée, efficace et rigoureuse garantissant la conformité des processus, la qualité des produits et la réduction de l'impact environnemental. L'adoption de ces normes améliore la réputation des compagnies et la confiance des parties prenantes, réduit les erreurs opérationnelles et assure la fiabilité et la durabilité des produits.

2.2.7 Impact du DfRem

Le DfRem a un impact révélateur sur les performances du remanufacturing des produits. Östlin et al. [72] ont établi qu'un niveau d'usure et de dommages plus élevés requiert des techniques de traitement plus coûteuses, c'est la raison pour laquelle le DfRem favorise la conception des produits spécifiquement adaptés pour le remanufacturing et met l'accent sur leur durabilité et leur capacité à résister à de multiples cycles de vie. Le DfRem vise également à mettre en place des tactiques pour optimiser les opérations grâce à l'utilisation de technologies et d'outils adéquats dans chaque étape du remanufacturing [73]. D'un point de vue environnemental, le DfRem encourage la réutilisation des ressources et des composants. Contrairement au recyclage, le remanufacturing conserve généralement les caractéristiques géométriques d'origine, ce qui réduit le besoin de ressources supplémentaires. Cela favorise la création d'un écosystème de haute qualité axé sur la durabilité environnementale [74]. En réduisant l'utilisation des ressources vierges, la production de nouveaux composants est limitée, ce qui entraîne une baisse des coûts d'acquisition totaux et des dépenses opérationnelles [75]. Enfin, concernant le pilier social du développement durable, le DfRem s'intéresse également à la sécurité des travailleurs et les conditions de travail [76]. Le remanufacturing crée de nouvelles opportunités d'emploi et favorise le développement de nouvelles connaissances, de techniques opérationnelles et de compétences spécifiques [77].

Le DfRem joue un rôle crucial dans l'industrie de l'aviation en abordant les principaux défis du remanufacturing, de l'impact environnemental, de la conformité réglementaire et des préoccupations sociétales. Le DfRem a permis le développement de nouvelles techniques de remise

à neuf [46], [47], [48], [78] ce qui démontre la volonté d'innover pour prolonger la durée de vie des composants. Le DfRem examine également les caractéristiques des produits comme les propriétés des matériaux et leur conformité aux réglementations. Lee et No [79] ont identifié les matériaux qui d'une part, améliorent les performances des avions et d'autre part, respectent les contraintes de sécurité imposées par les réglementations. Mais encore, en réponse aux divers incidents aériens survenus dans le passé, Lyon [80] a analysé les différents types de matériaux utilisés dans les avions, les méthodes d'essai modernes et les exigences liées à leur inflammabilité. Cette étude apporte des informations précieuses sur la diversité des matériaux exploités dans l'aviation et les protocoles d'essai rigoureux pour atténuer efficacement les risques d'incendie et garantir la conformité aux normes de sécurité.

Enfin, dans le cadre de l'amélioration continue du remanufacturing [52], de diverses données peuvent être analysées pour déterminer les obstacles. Ces données peuvent comprendre la performance et l'efficacité des activités du remanufacturing, la productivité des équipes, la qualité des composants et les retours clients qui demeurent une priorité absolue [81]. Plusieurs obstacles entravent ces activités dus au manque de sensibilisation, de connaissance et de motivation, ainsi qu'un déficit de structures organisationnelles promouvant le remanufacturing. Les décisions managériales, les réglementations et les contraintes légales influencent également les retours d'informations [71], [82]. Pour identifier ces lacunes et surmonter ces barrières, Lindkvist Haziri et al. [81] ont proposé plusieurs solutions axées sur l'amélioration des retours informationnels. Enfin, il faut accorder plus d'importance aux différentes parties prenantes dans le processus de remanufacturing pour améliorer la conception des produits et répondre ainsi aux attentes de chaque partie prenante.

2.3 Le QFD, un outil d'aide à la décision

2.3.1 Vers un outil plus durable

A ce jour, une variété d'outils sont à la disposition des concepteurs pour les aider à concevoir des produits répondant aux besoins des consommateurs. Cependant, l'émergence des enjeux durables pousse les concepteurs à reconsidérer leurs outils de conception. Alors que le monde se tourne vers les pratiques circulaires, Soh et Wong [83] explorent les améliorations potentielles des outils existants et l'implication des consommateurs dans la phase de conception des produits. Ils soulignent que l'utilisation des outils plus avancées et innovantes peut améliorer la conception des

produits, développer de nouvelles techniques de fabrication et favoriser une production durable et respectueuse de l'environnement. Cela permet ainsi de bénéficier d'un avantage concurrentiel en réduisant les coûts et en atteignant des objectifs durables.

Les premiers outils se basaient souvent sur des listes ou des tableaux visant à identifier les points chauds [84]. Au fil du temps, d'autres outils se sont développés, Royo et al. [85] ont dressé une liste des outils utilisés dans la littérature parmi lesquels figurent l'approche QFD, qui sera étudiée dans cette recherche.

2.3.2 L'approche QFD traditionnelle

L'approche traditionnelle du QFD était utilisée pour identifier et hiérarchiser les caractéristiques des produits en fonction des préférences des consommateurs, permettant aux concepteurs de planifier la production de manière plus efficace [8]. Han et al. [86] ont dépeint la méthodologie du QFD classique, incluant une matrice HoQ qui évalue les relations entre les attributs techniques et les exigences des consommateurs à l'aide de variables linguistiques telles que "Fort", "Moyen" et "Faible". Ces variables sont quantifiées par des nombres entiers distincts, puis grâce à des calculs arithmétiques, les attributs techniques sont classés selon leur score obtenu. Les auteurs ont appliqué cette méthodologie pour la conception d'un fer à repasser domestique et ont affirmé que cette approche leur permettait de mieux satisfaire les clients. Cependant, l'utilisation du QFD est de plus en plus dérivée. En effet, Delgado-Hernandez et al. [87] ont illustré un autre exemple d'utilisation du QFD dans l'industrie de la construction. Les exigences des clients sont pondérées en fonction de leur importance afin de se rapprocher de la réalité et de mieux prioriser les attributs techniques. Avec l'émergence des enjeux liés au développement durable et du concept d'économie circulaire, le modèle traditionnel du QFD doit être amélioré pour répondre à ces attentes. Zhang [88] a proposé une approche QFD durable intégrant une analyse du cycle de vie. Siwiec et al. [89] ont proposé une approche QFD-CE. Les auteurs ont ajouté une nouvelle dimension dans la matrice HoQ traditionnelle pour inclure les exigences des clients et les exigences liées à l'économie circulaire. Ils ont démontré leur nouvelle approche à travers une étude de cas se portant sur la conception d'un panneau photovoltaïque.

2.3.3 Intégration de la logique floue

Au-delà des méthodes conventionnelles et dérivées, il est possible d'intégrer la logique floue dans l'approche QFD. Bevilacqua et al. [90] ont dirigé leur recherche sur l'amélioration de la sélection des fournisseurs en ayant recours au QFD et à la fonction triangulaire. Les variables linguistiques supputées dans la matrice HoQ, sont fuzzifiées à l'aide d'un triplet de nombres afin de tenir compte des incertitudes dans la prise de décision. Lin et al. [91] ont introduit la fonction trapézoïdale comme une alternative à la fonction triangulaire pour mieux hiérarchiser les attributs techniques selon les besoins des clients. Ils ont réalisé une étude de cas sur les appareils photo numériques qui met en évidence la différence subtile entre l'approche QFD traditionnel et leur méthodologie. Sousa-Zomer et Miguel [92] ont développé une approche système produit-service durable. Les différents aspects du service se définissent comme le support après-vente, la maintenance, le service client ou l'assistance produit. En utilisant la fonction triangulaire, ils ont établi des relations entre les exigences des clients et les différentes propositions de service dans trois matrices distinctes selon le contexte économique, environnemental ou social, couvrant ainsi les trois piliers de développement durable. Ils ont également intégré la méthode AHP pour pondérer les exigences, ce qui permet une évaluation nuancée des différents services. Pour illustrer l'efficacité de leur approche, les auteurs ont présenté une étude de cas centrée sur le partage de vélos. Kuo et Hsin-Hung [93] ont élaboré une méthodologie consistant à aligner les attributs techniques avec les exigences des consommateurs. Cette méthodologie est particulière car elle analyse les points critiques environnementaux dans chaque phase du cycle de vie du produit. Avec la fonction triangulaire, la méthodologie offre plus de flexibilité à la hiérarchisation des attributs techniques et facilite la conception d'un produit plus durable. Lee et Park [94] ont accordé une attention particulière aux aspects sociaux, notamment la sécurité au travail. Dans leur étude de cas, ils ont dressé avec la fonction triangulaire, des relations entre les activités de construction avec les risques et les conséquences associés. De ce fait, les auteurs ont souligné l'importance de considérer l'aspect social dans les projets de construction pour des pratiques plus sûres dans l'industrie de la construction.

2.3.4 Application des différentes méthodologies QFD dans le remanufacturing

Alors que l'approche QFD était initialement utilisée pour améliorer la conception des produits afin de satisfaire les besoins. Cet outil d'aide à la décision trouve progressivement une utilité dans divers

contextes comme le remanufacturing. Rawariya [95], à travers la méthodologie classique du QFD, a déterminé les attributs techniques favorisant la remanufacturabilité d'un siège passager d'un automobile. Quant à Chen et al. [96], ils ont cherché à perfectionner l'activité de nettoyage dans le processus de remanufacturing. Grâce à cette approche QFD classique, ils ont identifié les caractéristiques fonctionnelles à optimiser comme le degré d'automatisme, la résistance à l'abrasion ou encore les vibrations mécaniques. En ciblant ces caractéristiques fonctionnelles, la qualité des produits remanufacturés s'améliorent grâce à une activité de nettoyage efficace. Armacost et al. [97] ainsi que Yüksel [98], animés par leur volonté d'améliorer le processus de remanufacturing, ont chacun mené une étude de cas dans le domaine automobile. Armacost et al. [97] se sont concentrés sur les démarreurs, tandis que Yüksel [98] sur les moteurs. Les auteurs s'étaient particulièrement attardés pour déterminer les attributs techniques et les exigences en matière de conception optimisant le processus de remanufacturing.

D'autres auteurs ont également œuvré pour mettre en évidence les caractéristiques techniques améliorant la remanufacturabilité en ayant recours à la logique floue dans l'approche QFD. Yang et al. [99] ont intégré la fonction triangulaire dans leur approche QFD et mettent en lumière les caractéristiques techniques qui améliorent la remanufacturabilité d'un automobile. Concernant la méthodologie de Zhang et al. [65], celle-ci comporte deux phases. Dans un premier temps, les auteurs ont classé les attributs techniques en fonction de la gravité des modes de défaillance. Ensuite, les attributs techniques les mieux classés sont confrontés avec les exigences de remanufacturabilité. A chaque phase, les corrélations sont exprimées à l'aide de la fonction triangulaire. Une étude de cas axée sur les vilebrequins et les arbres à cames a été réalisée pour illustrer la méthodologie.

Les études précédentes ont mis l'accent sur la remanufacturabilité des produits en privilégiant les attributs techniques. Cependant, il est également possible de faire usage de l'approche QFD pour sélectionner le scénario optimal de remise à neuf. Par exemple, Shi et al. [100] premièrement ont utilisé la méthode FMEA pour identifier les modes de défaillance susceptibles d'apparaître pour chaque composant d'un moteur pour engins lourds, puis ont attribué à chacun un coefficient. Dès lors, pour classer les différents scénarios et distinguer celui optimal, les auteurs ont défini les relations entre les différents scénarios de remise à neuf avec les composants à l'aide de la fonction triangulaire. De même, Jiang et al. [101] ont cherché à identifier le meilleur scénario pour remettre

à neuf un produit. Contrairement aux auteurs précédents, ils n'ont pas implémenté de fonction triangulaire dans leur méthodologie. Ils ont utilisé une régression linéaire floue au sein de la matrice HoQ pour estimer les relations entre attributs techniques et les différents scénarios. Ils ont appliqué leur méthodologie dans une étude de cas portant sur la remise à neuf d'un tour d'usinage. Dans leur étude, cinq caractéristiques de qualité du processus pour le tour, telles que la propreté de surface, la dureté, la précision, la linéarité et le parallélisme, ont été opposées trois scénarios alternatifs. Ces relations sont estimées par une régression linéaire floue. Dans cette situation, la régression linéaire floue est un outil précieux par rapport à la régression linéaire traditionnelle, en raison de l'incertitude, de la subjectivité et de la complexité des relations.

2.4 Synthèse de la revue de littérature

Pour réaliser la revue de littérature, les informations ont été collectées à partir de sources pertinentes disponibles dans les bases de données suivantes : Compendex, Science Direct, Scopus, Web of Science, Inspec, IEEE, Springer Link, Taylor and Francis et Statistique Canada. Quelques mots clés en lien avec le projet comme « remanufacturing », « Quality Function Deployment » ou encore « Fuzzy logic » ont permis une pré-sélection des articles. Ensuite, les articles étaient sélectionnés en fonction de leur pertinence par rapport au projet pour mieux comprendre et définir les concepts du remanufacturing et de logique floue. Le choix des articles comprend également les différentes approches QFD proposées dans la littérature et les études de cas liées à l'amélioration de la remanufacturabilité.

Le présent chapitre a, dans un premier temps défini le concept du remanufacturing et réalisé un état de l'art dans divers secteurs industriels. Il décrit les différents critères notamment techniques qui améliorent la remanufacturabilité des produits. Plusieurs applications dérivées de l'approche QFD ont ensuite été examinées à travers des études de cas illustrant l'efficacité de leur modèle. Ainsi, grâce aux contributions existantes dans la littérature, des tendances et des lacunes dans la littérature ont été identifiées.

Initialement, l'approche QFD traditionnelle privilégiait les attributs techniques des produits en fonction des besoins des consommateurs. Progressivement, cette approche a intégré les critères de durabilité notamment environnementaux, en raison de l'émergence des enjeux du développement durable. Certaines méthodologies ont également intégré la logique floue principalement via la fonction triangulaire. Malgré l'adoption croissante de la logique floue dans l'approche QFD,

l'utilisation de la fonction triangulaire prédomine, tandis que la fonction trapézoïdale demeure sous-exploitée. Cette tendance soulève des questions quant à la pertinence de la fonction trapézoïdale pour mieux appréhender les incertitudes inhérentes aux processus de conception et de remanufacturing. En effet, la fonction trapézoïdale, en offrant une plus grande flexibilité dans la définition des ensembles flous, pourrait permettre une modélisation plus précise des préférences des parties prenantes et des contraintes techniques, conduisant ainsi à des solutions de conception plus robustes et adaptées. L'exploration de cette piste pourrait ouvrir de nouvelles perspectives pour l'optimisation du remanufacturing dans l'industrie aéronautique.

De plus, la revue de littérature révèle un manque notable d'exemples d'application de l'approche QFD pour améliorer la remanufacturabilité des composants aéronautiques, en contraste avec son utilisation plus répandue dans l'industrie automobile. Cette lacune est significative car l'industrie aéronautique est confrontée à des enjeux environnementaux majeurs et pourrait bénéficier grandement des outils améliorant la remanufacturabilité. Enfin, bien que la littérature examine certains critères techniques pertinents pour la remanufacturabilité, les critères durables restent négligés. Cette négligence est problématique dans la mesure où considérer des critères de durabilité est crucial pour répondre aux exigences croissantes des enjeux environnementaux et sociaux, particulièrement dans l'industrie aéronautique qui cherche à se transformer en une industrie plus verte et répondre aux objectifs de décarbonation de l'aviation.

Grâce au Tableau 2.1, les tendances issues de la littérature ont pu être reconnues et sont détaillées dans la Figure 2.1. Il offre une vision globale et résume les différents articles tirés de la littérature en indiquant l'approche QFD utilisée et le cas étudié. A partir de ces études de cas, le Tableau 2.1 indique l'objectif de l'étude de cas, qu'il s'agisse de concevoir un produit ou d'améliorer la remanufacturabilité, ainsi que le secteur d'activité concerné tel que l'automobile, l'électronique, l'électroménager ou encore la construction. De plus, il précise les critères pris en compte dans l'approche QFD, qu'ils soient techniques, environnementaux ou sociaux. En conséquence, le modèle développé dans cette recherche vise à combler les fossés en appliquant une approche QFD améliorée employant la fonction trapézoïdale, et adaptée au contexte spécifique de la remanufacturabilité des avions, pour améliorer à la fois la durabilité, les activités liés au remanufacturing et les parties prenantes.

Tableau 2.1 Synthèse de revue de littérature

Auteur	Approche QFD	Secteur concerné	Etude de cas	Critères considérés
Han et al. [86]	Traditionnelle	Electroménager	Conception d'un fer à repasser	Techniques
Armacost et al. [97]	Traditionnelle	Automobile	Remanufacturabilité des démarreurs	Techniques
Lin et al. [91]	Fonction trapézoïdale	Electronique	Conception d'un appareil photo	Techniques
Kuo et Hsin-Hung [93]	Fonction triangulaire	Electronique	Conception des cartouches d'encre	Techniques et environnementaux
Bevilacqua et al. [90]	Fonction triangulaire	Logistique	Sélection des fournisseurs	Fonctionnels
Delgado-Hernandez et al. [87]	Traditionnelle	Construction	Conception d'un bâtiment hospitalier	Techniques
Yüksel [98]	Traditionnelle	Automobile	Remanufacturabilité des moteurs pour des véhicules	Techniques
Rawariya [95]	Traditionnelle	Automobile	Remanufacturabilité des sièges	Techniques
Yang et al. [99]	Fonction triangulaire	Automobile	Amélioration des activités du remanufacturing	Techniques
Jiang et al. [101]	Régression linéaire floue	Equipement	Remanufacturabilité d'un tour d'usinage	Techniques
Sousa-Zomer et Miguel [92]	Fonction triangulaire	Sport	Amélioration des services de partage de vélo	Environnementaux et économiques
Zhang et al. [65]	Fonction triangulaire	Automobile	Remanufacturabilité des vilebrequins	Techniques
Lee and Park [94]	Fonction triangulaire	Construction	Amélioration de la sécurité au travail	Fonctionnels et sociaux
Chen et al. [96]	Traditionnelle	Equipement	Amélioration du processus de nettoyage dans le remanufacturing	Fonctionnels
Shi et al. [100]	Fonction triangulaire	Automobile	Remanufacturabilité des moteurs pour des engins lourds	Techniques
Siwiec et al.[89]	Traditionnelle	Energies	Conception d'un panneau photovoltaïque	Techniques et environnementaux
Tang et Keivanpour	Fonction trapézoïdale	Aéronautique	Remanufacturabilité d'une aile d'un A350	Techniques, environnementaux et sociaux

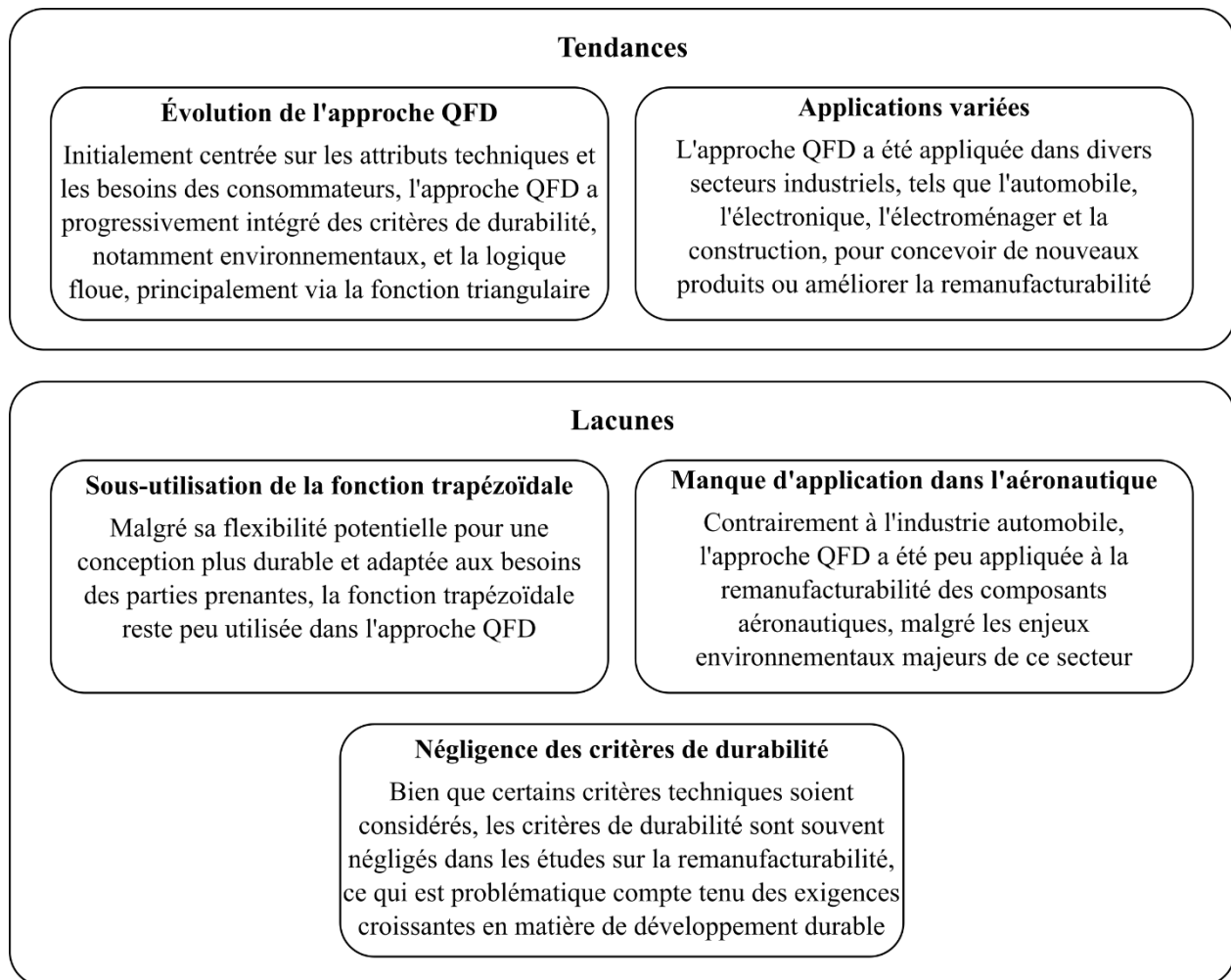


Figure 2.1 Tendances et lacunes identifiées dans la revue de littérature

CHAPITRE 3 ORGANISATION DU MÉMOIRE

3.1 Objectifs de recherche

La revue de littérature a mis en évidence les différentes tendances et lacunes qui ont motivées cette recherche. Celle-ci se concentre sur l'exploration et la promotion du remanufacturing au sein de l'industrie aéronautique, où la durabilité et la circularité deviennent des plus en plus cruciaux en raison de l'impact environnemental de ce secteur. Intégrer cette pratique dès la phase de conception des avions permet non seulement de prolonger la durée de vie des avions, mais aussi de respecter les exigences de performances et les réglementations strictes de l'aviation. Pour faciliter cette intégration, les objectifs spécifiques de cette recherche sont :

- Analyser et identifier les opportunités pour améliorer la remanufacturabilité des composants aéronautiques :

Il s'agit d'examiner en profondeur les processus actuels de conception et de fabrication dans l'industrie aéronautique afin de repérer les points de levier où le remanufacturing pourrait être efficacement intégré. Cela nécessite une compréhension des défis techniques, économiques, environnementaux et sociaux spécifiques à ce secteur ainsi qu'une comparaison avec les pratiques des autres secteurs industriels.

- Concevoir un outil d'aide à la décision destiné à intégrer les critères de remanufacturabilité et de développement durable dans la phase de conception des avions, en prenant compte des incertitudes et les exigences spécifiques à ce secteur :

Cet objectif vise à développer un cadre méthodologique robuste et flexible, qui pourra être utilisé par les concepteurs pour évaluer et prioriser les choix de conception afin d'améliorer la remanufacturabilité des produits tout en tenant compte des critères de durabilité. Cet outil devra également être conçu pour gérer les incertitudes liées à la prise de décision des concepteurs et au remanufacturing, afin de permettre une prise de décision éclairée dans un contexte de contraintes multiples.

3.2 Cheminement du projet

Le cheminement général du projet de recherche afin de répondre aux objectifs est schématisé dans la Figure 3.1 suivante. Les différentes étapes sont notamment inspirées de la démarche proposée

par Guichon [102] qui présente la progression d'un projet de recherche entre chaque jalon important.

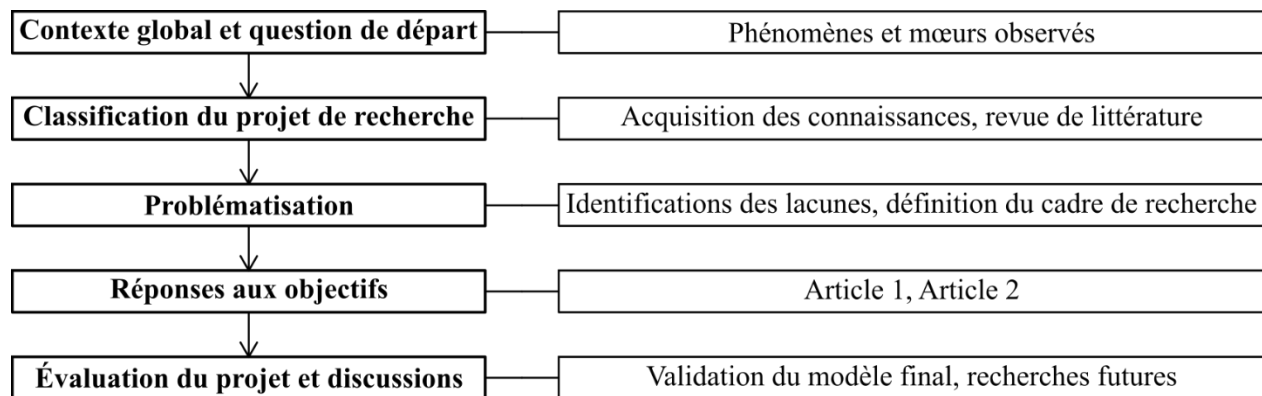


Figure 3.1 Cheminement du projet

Le contexte actuel et les enjeux durables ont soulevé des interrogations concernant l'intégration du remanufacturing dans divers secteurs industriels et son rôle crucial dans la transition vers une économie circulaire et ses pratiques durables. Il semble donc opportun de s'enrichir en connaissances et de conduire une revue de littérature afin de classer cette recherche. À l'aide de bases de données telles que Science Direct, IEEE, Springer Link ou encore Taylor and Francis, les mots-clés assujettis au contexte du projet ont permis dans un premier temps une pré-sélection des articles. Ensuite, la sélection finale des articles s'effectue en fonction de leur pertinence par rapport au projet pour mieux comprendre et définir les concepts du remanufacturing et de logique floue. La sélection comprend également des articles analysant les différentes approches QFD proposées dans la littérature et les études de cas liées à l'amélioration de la remanufacturabilité. Finalement, la revue de littérature a permis de dresser un état des contributions concernant le remanufacturing dans l'industrie de l'aviation et le développement des outils d'aide à la décision. De ce fait, des lacunes ont pu être identifiées et ont permis de fixer un cadre à ce projet de recherche. Les deux articles visent à combler cette déficience en proposant une nouvelle contribution qui sera détaillée dans le paragraphe 3.3 suivant. Enfin, en guise de conclusion dans cette recherche, il s'agit d'évaluer grâce à une approche qualitative, la validité et la robustesse du modèle développé au cours des deux articles puis de proposer des pistes d'amélioration pour la recherche future.

3.3 Contributions à la recherche

Deux articles ont été élaborés en réponse aux lacunes identifiées dans la littérature. Les Figure 3.2 et Figure 3.3 exposent les éléments clés de chaque article et mettent en lumière leur contribution.

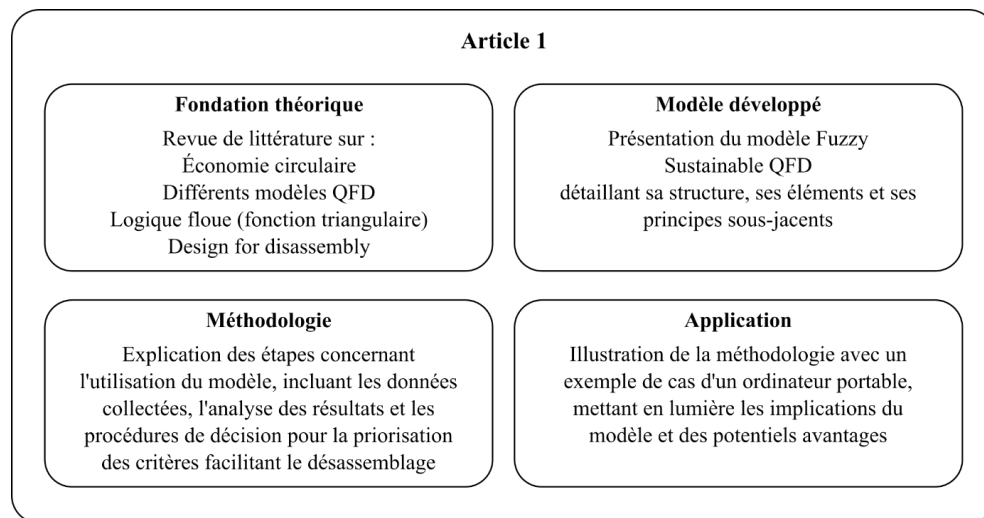


Figure 3.2 Éléments clés de l'article 1

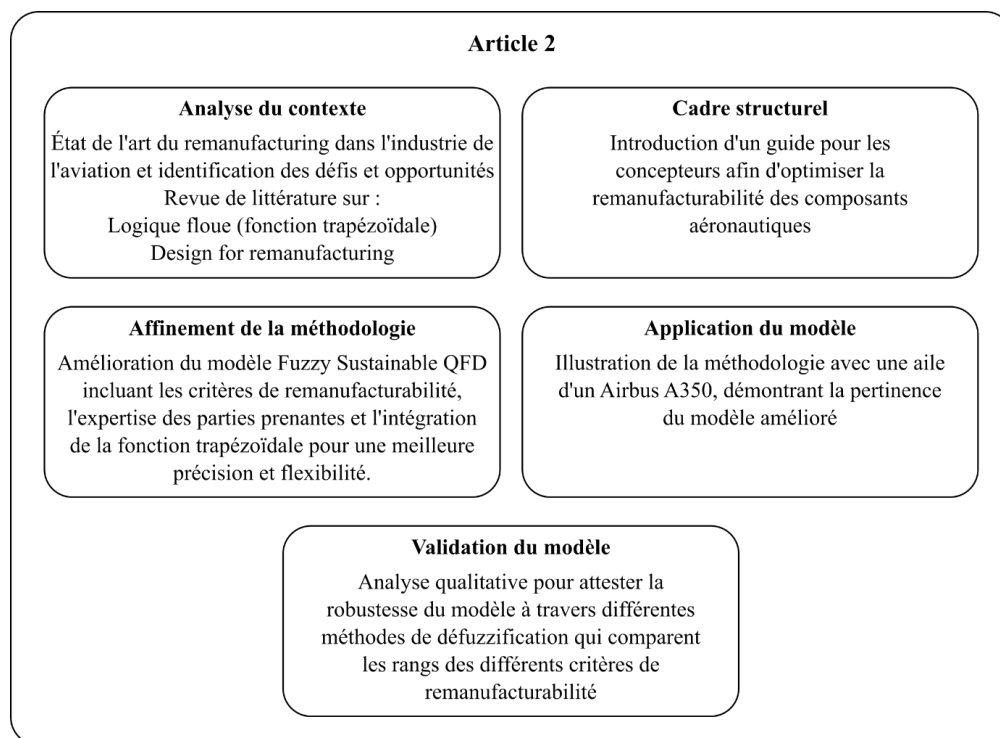


Figure 3.3 Éléments clés de l'article 2

D'abord, l'article 1 vise à développer dans un contexte d'économie circulaire, une première approche du Fuzzy Sustainable QFD pour optimiser le désassemblage, une étape essentielle dans le processus de remanufacturing. Basé sur le Design for disassembly, le modèle cherche à prioriser les critères facilitant le désassemblage, qu'ils soient de nature technique, environnementale ou sociale, dans le but d'améliorer l'efficacité des opérations de désassemblage et par conséquent, le remanufacturing. Cette méthodologie s'appuie sur une catégorisation des parties prenantes intrinsèques à l'étude pour une meilleure pondération des différents besoins. Puis elle se repose sur la fonction triangulaire de la logique floue pour intégrer les incertitudes inhérentes aux décisions des concepteurs. Enfin, une étude de cas portant sur les ordinateurs portables est présentée pour illustrer l'application de cette méthodologie et des critères de conception ont pu être hiérarchisés.

Mais force est de constater que le modèle développé dans l'article 1 reste encore perfectible. Dans la continuité du premier article, l'article 2 approfondit son étude sur l'ensemble du processus de remanufacturing allant de la mise en hors service des produits jusqu'au reconditionnement de ces derniers. Un état de l'art du remanufacturing dans l'industrie aéronautique a été mené et en réponse au fossé constaté par rapport à d'autres secteurs industriels, un guide est réalisé dans cet article afin d'aider les concepteurs à développer des avions favorablement conçus pour le remanufacturing. L'article 2 apporte également des améliorations au modèle Fuzzy Sustainable QFD et s'efforce de proposer une approche plus précise et fidèle à la réalité en mettant l'accent sur une meilleure prise en compte des parties prenantes et de leur expertise. De plus, le modèle se repose sur la fonction trapézoïdale pour une gestion plus efficace des incertitudes et une flexibilité accrue dans la prise de décision selon le degré de certitude des concepteurs et des parties prenantes. L'utilisation de la méthodologie est illustrée à travers un exemple d'application sur une aile d'un Airbus A350. Enfin, une approche qualitative vient compléter l'étude afin de valider la robustesse et la fiabilité du modèle final en comparant les rangs des différents critères à travers plusieurs méthodes de défuzzification.

CHAPITRE 4 ARTICLE 1: DEVELOPING A NOVEL ECO-DESIGN TOOL FOR DISASSEMBLING A COMPLEX PRODUCT UNDER UNCERTAINTY

Submitted on July 25, 2023, under review at 19th Global Conference on Sustainable Manufacturing,

Tang, H., Keivanpour, S.

Abstract. *Design for Disassembly (DfD) is a challenging concept that facilitates the disassembly of products for refurbishing and reusing their components. In the context of circular economy, DfD minimizes value loss at the end of product's life and remanufacture costs and maximizes environmental benefits. Therefore, DfD considers technical, environmental financial and social factors, but they are rarely integrated. Today, many studies state that the use of Quality Function Deployment (QFD) approach as a decision support tool helps to make choice by promoting one criterion over one another. However, a systematic approach should also consider uncertainties associated with DfD such as technical features, the recovered parts, the disassembly process, and the optimal disassembly sequence due to the product complexity. The current paper analyzes and compares different QFD approaches in the literature review and then provides a new Fuzzy Sustainable QFD (FS-QFD) methodology, which integrates the three pillars of sustainability. Finally, it shows the effectiveness of the suggested approach through a numerical example*

Keywords: *Sustainable QFD, Design for Disassembly, Fuzzy numbers, Decision support tool*

4.1 Introduction

At the dawn of the 21st century, despite a more environmentally aware and inclusive society, there are still goals to reach in order to make the world more sustainable [2]. While designers were looking to optimize the technical performance of products, they are now interested in design for remanufacturing (DfRem). Indeed, the notion of remanufacturing is in line with circular economy which is an emerging concept that also takes into account social and environmental criteria [6]. Thus, the present paper will focus on disassembly which is an essential stage in the remanufacturing process. It enables the reconsideration of product components at their End-of-Life (EOL), thus extending its lifespan [103]. As far as designers are concerned about social and environmental stakes, they need decision support tools in order to make choices and improve the disassembly

operation. Although the traditional QFD methodology as an eco-design tool is popular, the increasing complexity of products has led designers to rethink the approach. Unlike DfRem, a fuzzy approach for DfD is not widely used. The current paper intends to propose a FS-QFD approach for DfD based on the uncertainties related to customers' expectations. The paper extends the existing FS-QFD approach by incorporating customer segmentations and circularity criteria, which are key factors for eco-design. Customer segmentations can help to identify the different needs and expectations of different customer groups, while circularity features can help to reduce the environmental impact and increase the resource efficiency of the product. In addition, it focuses on the design for disassembly of laptops, which is a specific and complex product that requires a tailored eco-design tool. The paper is conducted in several sections. The first one is the literature review, followed by a presentation of the proposed method. Then, a numerical example illustrates the model. Finally, the conclusion and remarks are given in the last section.

4.2 Literature review

The aim of this literature review is to understand the various issues involved in the disassembly process and its parameters in the context of the circular economy. It also aims to identify and understand some of the QFD approaches used in the literature to propose a novel eco-design approach.

4.2.1 Design for disassembly and parameters related to circular economy

Disassembly is one of the essential steps in the remanufacturing process because parts and components have to be evaluated, cleaned and refurbished before being reused and reassembled [103]. While the preeminent philosophy of the circular economy is essentially to extend the products lifespan, den Hollander et al. [104] discussed the stage of product design and the environmental benefits of remanufacturing. According to Charter and Gray [5], remanufacturing also offers others benefits, both economic and social. Indeed, the process of remanufacturing including the disassembly's stage creates employment, new skills and leads to innovation and creativity. Thus, remanufacturing covers the three pillars of sustainability [105]. Therefore, disassembly must be carefully considered in the design stage of the product. While DfD improves the ease of remanufacturing, Soh et al. [58] underlined the importance of scrutinizing the disassembly sequence and reminded that the three main challenges in DfD are methodology, technology and human factors. Some authors have proposed different methodologies which

optimize the disassembly sequence for saving time and cost, however operators may find it difficult to access fasteners or parts [103], [106]. There are also others factors that affect DfD particularly materials, architecture and fasteners and connectors. Thanks to materials studies, DfD improves the environmental impact of products [107]. Finally, Crowther [108] discussed that DfD can be based on three-dimensional hierarchic level : resources, lifecycle stage and strategies like conserving, reusing, recycling, protecting or quality. Crowther believed that DfD can reduce the number of materials and components, avoid toxic and hazardous materials, and design a simple product that is easy to dismantle and interchange with other products

4.2.2 Quality Function Deployment as an eco-design tool

The trend of an eco-design tool is reducing environmental impact and costs by comparing these indicators at every stage of product life cycle. However, the modern concept of circular economy leads designers to rethink the relevance of the eco-design tool because the concept is more centered on the three pillars of sustainability, with particular attention paid to the EOL phase [109]. Ultimately, some new methodologies that integrate the concept are developed in the literature. Soh et Wong [83] introduced an advanced methodology which explains a new approach of eco-design in the context of circular economy. In the literature, the first eco-design tools developed were checklists or tables for identifying hot spots [84]. A survey summarized many eco-design methods and tools related with circular economy, one of them is Quality Function Deployment which will be the main point of this paper [85]. By using a House of Quality (HoQ), the designer can favor technical features based on the results provided by the classical QFD approach. In this way, it allows better products design [87].

4.2.3 Fuzzy Sustainable QFD

However, as products and their objectives become more complex, novel approaches must be constantly proposed. Some papers have shown other alternative QFD approaches. Indeed, Siwec et al. [89] proposed a QFD-CE method based on the goals of the circular economy and customers' needs. The method modifies the HoQ by adding a floor granted to the circular economy. Romli et al. [110] suggested a QFD approach whose procedure is divided into four successive stages. They justified the environmental selected parameters affiliated to the manufacturing process. Shi et al. [100] developed a fuzzy QFD approach for improving an engine's remanufacturing process. Fuzzy information was used to correlate customers' needs with remanufacturing process solution

alternatives. Yang et al. [99] submitted a fuzzy QFD approach for DfRem and bolstered their model with an automotive case study. The authors focused on environmental issues and costs associated with remanufacturing activities. As Gun and Sang [94] discussed in their construction case study, a fuzzy QFD approach allows the manager to conduct the work properly and in line with the objectives set.

4.2.4 Synthesis of literature review

To sum up, the present literature review emphasizes the parameters linking the concept of DfD and circular economy and highlights different framework of fuzzy QFD approaches. Table 4.1 provides the differences or similarities between the numerous studies on DfD or DfRem using QFD approach. As a result, gaps in the literature are identified. Despite the amount of work around fuzzy QFD, DfRem is more covered than DfD, that is why the paper focuses on DfD. Also, it shows the lack of consideration for the uncertainties associated with customers' expectations. Only the weights provided by customers' expectations are given by fuzzy numbers, and yet the panel of customers surveyed is very heterogeneous. It would be interesting to categorize and weight the different customers since they have different requirements [111].

Table 4.1 Parameters' comparison between DfD or DfRem case studies

Reference	Case study / Numerical example	Main parameters used
Shi et al. (2023) [100]	Remanufacturing an engine for heavy-duty trucks – Fuzzy QFD and fuzzy FMEA approach	Remanufacture process Failure mode
Yang et al. (2013) [99]	Remanufacturing in automotive industry – Traditional HoQ with deviation of parameters weights	Remanufacturability Environmental impact and costs Operators' workload
Keivanpour (2023) [112]	Disassembling parts in industry 4.0 – Factors' importance is represented by triangular fuzzy numbers	Ease of disassembly Environmental impact and costs Operators' workload
Zhang et al. (2019) [65]	Remanufacturing an engine's crankshaft – Traditional QFD with fuzzy weighting	Remanufacturability Failure mode
Zhang et al. (2015) [113]	The use of spindle in a remanufacturing process – Results from fuzzy linear regression complete the HoQ	Failure mode Process characteristics
Yüksel (2010) [98]	Remanufacturing in automotive industry – Traditional QFD approach	Remanufacturability
The present paper	Disassembling a laptop – FS-QFD approach	Disassembly, environmental and social impact

4.3 Methodology

In this section, we propose a FS-QFD approach, which is an improvement over the conventional QFD method. The FS-QFD approach differs from the classical QFD in diverse ways. Unlike the traditional QFD, which only considers the functional requirements of products, this approach considers the environmental and social impacts of products in the design process. The methodology uses fuzzy numbers to represent the customers' needs, which are often vague and uncertain. The fuzzy numbers quantify the degree of satisfaction of customers with different product attributes. The novel approach also includes customers segments in the QFD structure allowing us to identify the different needs and preferences of various customers groups and tailor the product design accordingly. The structure of our methodology is shown in Figure 4.1.

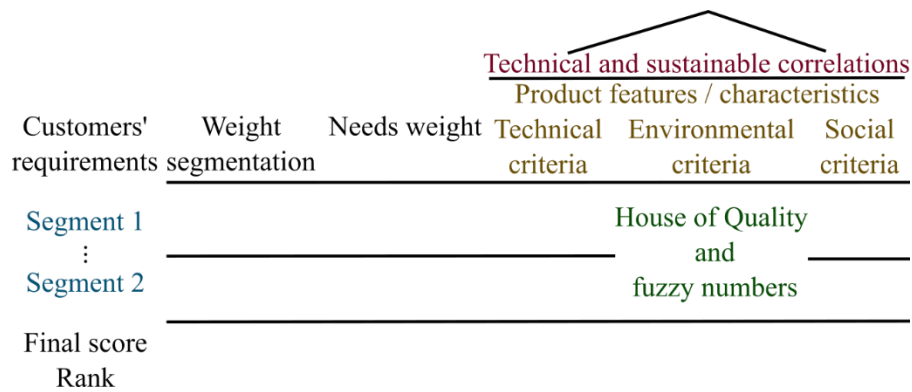


Figure 4.1 FS-QFD approach for DfD

The FS-QFD approach has the following steps:

- Step 1: Identify and prioritize customers' needs.
- Step 2: Assign the weights for customers' requirements are calculated by averaging all values between 1 and 5, and then translated by a triplet of numbers: (1, 2, 3) is for weak level, (4, 5, 6) is for medium, (6, 7, 8) is for strong and (7, 8, 9) for very strong. In this stage, customers' needs are also segmented according to categories of people.
- Step 3: Identify and prioritize technical features, and environmental and social criteria.
- Step 4: Construct the HoQ matrix and fill it with fuzzy triangular numbers that translating the mutual influence between customers' needs and technical features, and sustainability criteria. Then, scores are calculated by multiplication of the elements in the relationship matrix and weights. The variable k represents the segment of customers' expectations, n

the index of customers' needs for each segment, A_k represents the matrix of needs' weight, B_k fuzzy triangular numbers and C weights of each segment of customers' needs. Equation (1) shows the score $\tilde{S}_k$ of each column and equation (2) reveals the final score S .

$$A_k = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} \end{pmatrix}_k, B_k = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & b_{n3} \end{pmatrix}_k \text{ and } C = (c_k), \forall k, \forall n$$

$$\tilde{S}_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 \frac{(a_{ijk} \cdot b_{ijk})}{3}, \forall k, \forall n \quad (1)$$

$$S = \sum_{k=1}^m c_k \cdot \tilde{S}_k, \forall m \quad (2)$$

- Step 5: Evaluate final scores and rank in order of importance.

4.4 An illustrative example

As far as FS-QFD approach can be applied to any products in the context of manufacturing, the aim of the following case study is to demonstrate the methodology of circular design for the electronics industry, focusing on laptops as an example. The first methodology's step is to elicit and segment customers' needs including circular parameters. The second step is to segment and weight customers' expectations according to the target users. This step recognizes that different customers may have different product needs and priorities. For example, a student may value low cost and durable product more than a professional who may value high performance and large storage space more. The third step is to identify the sustainability criteria that affect the disassembly operation of laptops. The criteria are divided into three categories: technical, environmental, and social. Based on the guidelines and recommendations from the literature, technical criteria that affect DfD include weight, shape, size, material, structure, number of components, and connection and fasteners. Other technical criteria are comprised such as software and electronic hardware. Environmental criteria are composed of energy use including gas, petroleum, electricity, renewable energies, and coal [114], carbon footprint, raw materials consumption, and waste generation. Social criteria include operators' workload, stress and fatigue, and risk of injury. Then, after constructing the HoQ, the final scores are calculated to rank the most influential parameters. The details and results are shown in Figure 4.2. The main finding is that Material is the most crucial factor to consider for circular design of laptops, followed by Energy use and Waste.

			Technical features										Environmental criteria				Social criteria		
Customers' needs	Segments' weight	Needs weight	Weight	Shape	Size	Material	Structure	Numbers of components	Connection and linkers	Software	Electronic hardware		Energy use	Carbon footprint	Material usage	Waste	Operators' workload	Stress and fatigue	Injury risk
High performance Long battery life Large storage space Light weight	0,30	(1, 2, 3) (4, 5, 6) (1, 2, 3) (4, 5, 6)				(1, 2, 3) (4, 5, 6)	(1, 2, 3) (1, 2, 3)	(1, 2, 3) (1, 2, 3)		(7, 8, 9) (4, 5, 6) (4, 5, 6)	(6, 7, 8) (6, 7, 8) (6, 7, 8)		(4, 5, 6) (4, 5, 6) (4, 5, 6)						
Score Segment 1			40,6	35,6	35,6	56	36,3	36,3	25,6	53	65		10,6	0	0	0	0	0	0
Affordable price Durable and rugged Security features	0,30	(7, 8, 9) (6, 7, 8) (4, 5, 6)				(1, 2, 3) (6, 7, 8)	(6, 7, 8) (4, 5, 6)	(1, 2, 3) (4, 5, 6)		(6, 7, 8) (4, 5, 6) (1, 2, 3)	(6, 7, 8) (6, 7, 8) (4, 5, 6)								
Score Segment 2			31,3	0	0	106,3	40,6	40,6	40,6	67,3	118		0	0	0	0	0	0	0
Less energy Less carbon footprint Less wastes Less material usage Ease of disassembly Recyclable materials Safety standards Workers' condition	0,40	(6, 7, 8) (6, 7, 8) (6, 7, 8) (4, 5, 6) (4, 5, 6) (7, 8, 9) (4, 5, 6) (1, 2, 3)				(1, 2, 3) (1, 2, 3) (6, 7, 8)	(1, 2, 3) (1, 2, 3) (1, 2, 3)	(7, 8, 9) (7, 8, 9) (7, 8, 9)		(1, 2, 3) (7, 8, 9) (7, 8, 9)	(7, 8, 9) (7, 8, 9) (7, 8, 9)				(6, 7, 8) (7, 8, 9) (7, 8, 9)			(4, 5, 6) (4, 5, 6) (4, 5, 6)	(4, 5, 6) (4, 5, 6) (4, 5, 6)
Score Segment 3			10,6	25,6	10,6	132,3	40,6	57,3	40,6	0	14,6		73,3	73,3	131	108	16,6	66	66
Score			25,81	20,92	14,92	101,61	39,31	45,99	36,10	36,09	60,74		32,50	29,32	52,40	43,20	6,64	26,40	26,40
Rank			12	13	14	1	6	4	7	8	2		9	10	3	5	15	11	11

Figure 4.2 A FS-QFD approach applied to a laptop DfD case study

4.5 Conclusion

Traditional QFD approach is a design tool that allows to associate customers' requirement with technical criteria and that solves conflicting design requirements. The paper presents an alternative approach that adds social and environmental features in response to a more circular product policy. Also, due to uncertainties and vague information, fuzzy numbers are included in the decision support tool to bring more reflection about solutions. As customers' categories are heterogenous, weighting customers' expectations seems decisive. An example from the electronics field is provided for illustrating the FS-QFD methodology. However, there are some limitations of the case study. The sustainability criteria and circular parameters may not be representative of all the aspects of circular design for laptops. Indeed, it would be relevant to scrutinize other environmental criteria such as water consumption, eco-toxicity, greenhouse gas or acidification, in future research. The customers' needs may depend on the context, culture and personal preferences of the customers and its segmentation and weighting may not reflect the actual market demand or users' behaviors. The final score may be sensitive to the choice of scoring method, data sources and assumptions. Thus, this model could be upgraded in several ways. Firstly, using interval-valued fuzzy numbers instead of triangular fuzzy numbers would gain control more accurately and flexibility on uncertainties and variabilities of relationships between customers' expectations and product features. Also, to improve the segments' weight, it could be interesting to use an Analytic Hierarchy

Process to arrange customers' requirements as well. So, the results obtained from feedback or surveys would allow us to determine more precisely needs to be well weighted. Also, a sensitivity analysis should be performed to complete the AHP. With an One-At-a-Time (OAT) methodology changing one parameter at a time, it enables to compare different solution and evaluate, if certain weights generate strong imbalance of decisions [115].

CHAPITRE 5 ARTICLE 2: STAKEHOLDER-DRIVEN ECODESIGN FOR AEROSPACE REMANUFACTURING: A FUZZY-SUSTAINABLE QFD FRAMEWORK FOR MANAGING UNCERTAINTY

Under review in Journal of Industrial and Production Engineering, Taylor & Francis Online

Tang, H., Keivanpour, S. (Submitted on July 10, 2024)

Abstract. *Developing sustainable practices is crucial to minimize environmental impact and optimize product lifecycle management. This paper introduces a novel approach using Fuzzy Sustainable Quality Function Deployment to enhance remanufacturing processes within the aeronautical industry. The study aims to identify and prioritize product features and sustainable criteria to improve aircraft remanufacturability, thereby extending component life and reducing wastes. The methodology involves a comprehensive analysis of requirements for remanufacturability and accommodates uncertainties by using trapezoidal fuzzy numbers to address subjectivity and imprecision in decision-making. Findings highlight the importance of aligning remanufacturability requirements with product features and sustainable criteria to enhance remanufacturing aeronautical components. This research advances the QFD approach by incorporating fuzzy logic to support sustainable remanufacturing practices, offering a valuable tool for decision-makers, in the aeronautical sector and beyond. An application example within the aeronautical industry and a qualitative assessment demonstrates the effectiveness of the proposed approach and its robustness.*

Keywords: *Fuzzy Sustainable QFD, Remanufacturing, Aeronautical industry*

5.1 Introduction

The ever-growing number of airline passengers has led to higher emissions and denser use of airspace with a larger air fleet [36]. The aviation industry has witnessed a compelling increase in aircraft production since the 1970s, contributing significantly to emissions, overuse of primary resources, and depletion of raw materials [37]. Moreover, this productivity trend has led to a surge in aircraft reaching their End of Life (EOL) in recent decades. However, aircraft have not been specifically designed to facilitate EOL processus and are often disposed of in landfills. Ultimately, this accumulation of waste, negligence, and the lack of sustainable practices have tarnished the perception of aviation industry as a polluting sector in urgent need of improvement [38].

Remanufacturing seems an emerging strategic solution to alleviate environmental impact. It offers opportunities to extend product life cycle and reduce resource consumption and wastes [116]. In the context of the aviation industry where stringent safety and reliability requirements must be complied, preserving rare materials and high value aircraft parts is essential. Remanufacturing in the aviation industry appears promising for the future, as Rahito et al. [47] elaborated for instance. They discuss the potential of using metal deposition additive manufacturing for refurbishing turbine blades of aircraft components. Shrivastava et al. [46] also discussed the precise and efficient advantages of using additive manufacturing for restoring engines blades and how their mechanical properties can be preserved. Chen et al. [45] studied the laser cladding for remanufacturing landing gear. They described the benefits of laser coating as providing protection against surface cracking and porosity, particularly in a foggy environment. In addition, Liang et al. [48] studied the effects of hybrid remanufacturing involving laser cladding, CNC machining, and ultrasonic rolling on the surface integrity of jet engine blades. However, despite several solutions proposed in the literature for improving remanufacturing techniques, the challenge remains in implementing sustainable practices and designing products that optimizes remanufacturability.

The use of Quality Function Deployment (QFD), a decision-making tool, is essential due to the complex nature of aircraft and their safety, reliability and performance requirements. The QFD approach considers remanufacturability into aircraft design and enables designers to identify and prioritize technical characteristics according to stakeholder requirements.

Zheng and Pulli [117] presented the generic framework of QFD approach and were aware on voice of customers for stating customers' requirements. Then, a matrix evaluated the level of relationship between the customers' requirements and technical characteristics. In their case study, the authors weighted and prioritized technical characteristics depending on customers' requirements. Then, main technical characteristics are combined with mobile services hardware, software, and service content providers. Finally, the authors determined specific strategies to develop a real service for mobile phones. Tidwell and Sutterfield [118] conducted a case study on supplier selection. Firstly, an Ishikawa diagram emphasized design features for suppliers such as price, value added design, physical properties, production capability, and material grade. Then, the relationship matrix in the traditional QFD approach associated the design features with supplier characteristics. In this way, the authors calculated a satisfaction score for each supplier to compare different suppliers. They selected the supplier which had the most important score. Chen [119] explained the interest in using

traditional QFD approach for satisfying customers and minimizing potential failure. His case study from the semiconductor industry demonstrated the model's applicability and suitability. The author aimed to select the appropriate semiconductor assembly process according to material used and product features designed.

While traditional QFD has proven effective in translating customer requirements into product features, its limitations in addressing sustainability criteria and inherent decision-making uncertainties have become increasingly apparent. The growing societal emphasis on environmental awareness and sustainable development goals necessitates a re-evaluation of this widely used tool. This research addresses this gap by integrating fuzzy logic into the QFD process, enabling a more robust consideration of sustainability factors and accommodating the imprecise nature of design choices. This study introduces a novel Fuzzy Sustainable Quality Function Deployment framework tailored for Design for remanufacturing (DfRem) in the aeronautical industry. The proposed framework aims to enhance the remanufacturability of aeronautical components, contributing to both environmental sustainability and economic efficiency within the industry.

This research outlines the main contributions as follows:

Consideration of sustainable criteria in the QFD approach to enhance the circularity of the remanufacturing process. This contributes to reducing environmental impact, optimizing resources, and improving product lifecycle management.

Incorporation of fuzzy logic techniques, particularly trapezoidal fuzzy numbers, to address subjectivity and imprecision related to uncertainties in remanufacturing and decision-making

Identification of technical and sustainable criteria, as well as activity strategies, that enhance the remanufacturability of aeronautical components.

The rest of this paper is organized as follows. Section 5.2 explains the principle of remanufacturing in the aviation industry, the context of DfRem, and the integration of sustainable criteria. It also analyzes different QFD methodologies and identifies the potential gaps. Next, Section 5.3 provides a DfRem guideline, useful for an aeronautical case study application. In response of gaps, this section describes the Fuzzy Sustainable QFD methodology and the integration of trapezoidal fuzzy numbers. Section 5.4 illustrates the methodology with an application example on an aircraft wing of an Airbus A350 aircraft. Section 5.5 includes results and discussion. Finally, Section 5.6 summarizes the paper and outlines the futures steps for this research study.

5.2 Literature review

Remanufacturing, a core pillar of the circular economy, involves restoring products to like-new condition through a series of rigorous processes. While this approach offers environmental and economic benefits, its application within the aeronautical industry faces unique challenges. Historically, aircraft design has not prioritized ease of remanufacturing, leading to components being prematurely discarded and often ending up in landfills. This reality underscores the crucial importance of Design for remanufacturing, an approach that integrates remanufacturability considerations into the initial product design stages. To effectively implement DfRem, robust decision-making tools are essential. This literature review examines the role of QFD as a potential solution, exploring existing methodologies and identifying their limitations. By analyzing the gaps in current approaches, this review lays the groundwork for the development of a novel decision-making framework aimed at enhancing remanufacturability within the aeronautical sector.

5.2.1 Remanufacturing aircraft

The significant rise in air passenger traffic since 1970, reaching 4.56 billion annual passengers in 2019 [36], has occurred challenges and opportunities in the aviation industry. Air traffic density has never made air mobility easier. However, this is leading to an ever-increasing demand for aircraft production, contributing significantly to emissions, overuse of primary resources, and depletion of raw materials [37].

Furthermore, this ever-growing productivity has resulted in raise of aircraft reaching their End of Life in the next years [38]. Managing EOL product has become a unique challenge, necessitating innovative solutions for a more circular society. The circular economy represents an economic model and resource management system aimed at minimizing wastes and extending product life. In contrast to traditional linear manufacturing, where resources are extracted, transformed into products and finally disposed of as a waste, circular economy promotes the reintegration of components with sufficient residual value back into the manufacturing chain [120]. So, three alternatives EOL management strategies are suggested: reuse, remanufacturing, and recycling. Figure 5.1 Three EOL strategies for closing the linear manufacturing chain shows how loops are closed, and products are reintegrated in the linear chain. The objective of a closed-loop chain is to maximize the material's utility across various uses.

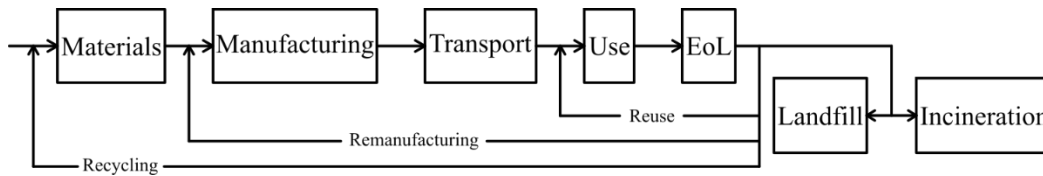


Figure 5.1 Three EOL strategies for closing the linear manufacturing chain

Reuse is a non-destructive process commonly employed for mature products [13]. It offers several benefits, including the extension of product lifespan, conservation of resources, and reduction of CO₂ emissions. Additionally, it minimizes waste generation by maintaining products in circulation rather than disposing of them in landfills [121]. Reuse requires less energy compared to manufacturing new products, resulting in reduced energy consumption and emissions. It also saves costs associated with higher material prices for new products and reduces the need for energy production from new materials [14]. Furthermore, reuse benefits both consumers and producers by fostering sustainable initiatives such as swap meets or secondhand marketplaces [15]. The recycling process encompasses a series of steps, including collecting, sorting, cleaning, shredding, and transforming discarded products into reusable resources or materials [16]. This EOL strategy offers various advantages by conserving natural resources (e.g. water, energy), reducing waste, and lowering energy consumption. By providing valuable recycled materials, recycling decreases the demand for virgin resources and the volume of waste sent to landfills or incinerators [17]. Despite these benefits, challenges persist, such as defining recyclability of materials based on their ability to regain their original properties. Additionally, recycling still compels additional energy to transform discarded products into recycled materials [18]. Finally, remanufacturing, distinct from the two other EOL strategies, restores products to a level comparable to their original state [19]. This process involves extracting components from discarded products that have sufficient residual value to be reintegrated into new products [20]. It is constituting into several activities: collection, inspection, disassembly, cleaning, sorting, reconditioning, repairing, and testing. Due to the total dismantling of products, restoration or replacement of its components, remanufacturing ensures a high standard of work and products' reliability [40].

In the case of aircraft, owners or airlines decide that an aircraft has reached the end of their operational life when maintenance costs or the expense of upgrading to comply with new regulations become high, replacement parts are difficult to source, or components come to be obsolete [39]. The quantity of retired aircraft increases each year, and disposing of them in landfills

does not appear to be a sustainable approach. Although they no longer belong to manufacturers, such as Airbus or Boeing, the latter convey a negative environmental impact and harm their brand name. That is why PAMELA (Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft), originally an initiative launched by Airbus in the 2000s and supported by the European Union's LIFE group (French: L'Instrument Financier pour l'Environnement), intended to develop an alternative approach to managing EOL aircraft. It represented an initial step towards introducing environmentally safe practices for sustainable EOL aircraft management. PAMELA also demonstrated that 85% of aircraft components still retain residual value and encouraged discussions between designers team and manufacturers [39], [57]. Thus, the concept is as follows: EOL aircraft retain various components and materials that can be reintegrated into the linear chain, thereby conserving materials, energy, resources, and developing capital and labour for producing new aircraft. Consequently, remanufacturing dwindles the demand for virgin materials, minimizes resources consumption, and reduces costs [49]. In addition to its environmental benefits, the remanufacturing process provides significant economic, social, and business advantages. Remanufactured products are typically priced lower compared to new products while maintaining the same level of quality as the original products. Moreover, remanufactured products often come with longer warranties, ensuring an extended product life and increased customer satisfaction. From a social perspective, remanufacturing contributes to job creation and skill development by requiring specialized techniques and expertise in the remanufacturing process. This not only enhances employment opportunities but also fosters the growth of a skilled workforce capable of managing remanufacturing operations efficiently [50]. Thus, the remanufacturing is aligned with all the three pillars of sustainable development. However, there is a need to optimize this process within the aeronautical sector, which currently lacks clarity and comprehensive implementation strategies. Indeed, despite a progressive development of techniques that conducted to sustainable benefits, Airbus and Boeing showed limitations of the EOL aircraft [51].

5.2.2 Design for remanufacturing

5.2.2.1 Design for remanufacturing guideline

In order to promote circularity, it is imperative to develop a suitable design that enables certain components to be reintegrated into the value chain [31]. However, it is not very common that Design for remanufacturing is disregarded during the initial design phase [52]. Nevertheless, by

implementing enhancements to the remanufacturing process right from the design stage, it is feasible to upgrade efficiency, quality, and costs productions while alleviating environmental and social impacts that DfRem can avoid [53]. If a manufacturer desires to convert its facility into a remanufacturing space, making significant modifications at a later stage would be impractical [122]. Thus, the aim of Design for remanufacturing is to ensure product remanufacturability and the latter should be promoted at the early stage of design [59]. According to the literature, by addressing constraints and optimizing processes for each remanufacturing stage, remanufacturability of products can be enhanced [54], [55], [59]. This involves understanding the design factors associated with product characteristics and features, as defined by technical attributes, and environmental and social criteria [56], [123], [124]. In aeronautics, design factors for remanufacturing are focusing on remanufacturability requirements, such as ease of decommissioning, ease of disassembly, ease of inspection and sorting, ease of cleaning, ease of repairing and reconditioning, ease of testing and certification, and reverse logistics efficiency. These factors, whether technical or operational, summarized in a DfRem guideline, can impact the integration difficulty of DfRem in remanufacturing [125]. However, few guidelines are provided for the aeronautical industry, and only a limited number of criteria are considered (e.g., material, joints and fasteners, or modularity) [59], [126], [127]. Most design factors are identified through literature review, deduced from case studies, interviews, existing workshop operative method or plans provided by manufacturers [40], [67], [75], [128]. For example, Amezquita et al. [67] assessed the product features of an automobile door to determine factors influencing ease of repair. The aim of the following paragraph is to look for most effective application of DfRem in order to overcome remanufacturing obstacles and challenges in aeronautical industry.

- **Ease of decommissioning:** The decommissioning phase marks the beginning of the aircraft remanufacturing process and must be carried out effectively to facilitate subsequent tasks. During decommissioning, aircraft owners or airlines decide to take aircraft out of service, involving the removal of all fluids and hazardous substances. Thus, to improve ease of decommissioning, it would be advantageous to design aircraft architecture that facilitates preparation and fluid removal, and to establish safety protocols to mitigate injury risks related to fluid contamination. Additionally, it is also advisable to use fluids that can be reused multiple times, even after removal from aircraft, with minimal environmental impact [57].

- **Ease of disassembly:** Disassembly involves separating various components of a product. It is essential to have impeccable knowledge of materials, structure, and part composition. Regarding aircraft disassembly, this typically involves engines, landing gears, avionics, auxiliary power units (APUs), ram air turbines (RATs), cabin equipment, and structure [57]. Disassembly is a crucial step for remanufacturing feasibility and cost efficiency, for instance, the disassembly should not be destructive [54]. During this phase, designers must implement activities that facilitate disassembly. Firstly, establishing a disassembly sequence is important to save time and costs while reducing labor efforts [58]. Understanding the geometry, exact positions, and connections among various parts of the aircraft by using manufacturer technical information is essential. Thus, it is possible to scheme design factors that are related to ease of disassembly. Shu and Flowers [59], and Cruz Rios et al. [60] highlighted the need to reduce the quantity and variety of fasteners and use standard fasteners to facilitate separation and avoid prolonged disassembly time. Behrendt et al. [61] argued that disassembly time and effort depend on the number and type of connections. Therefore, structural form is important, and its components should be designed hierarchically. Finally, to improve working conditions, it is necessary to enhance accessibility to components and fasteners to make work less laborious. Thus, sustainable procedures can be implemented to decrease the environmental impact and to mitigate injury risks, such as avoiding toxic materials or dangerous shapes like sharp edges or rough materials [61].
- **Ease of cleaning:** The cleaning phase is one of the most challenging stages. According to Sundin and Bras [40], the cleaning phase is identified as one of the most costly operations in remanufacturing, as evidenced by two case study in electronic and automotive sectors. This highlighted the importance of optimizing the cleaning process to reduce costs, time, and energy. Hammond et al. [62] mentioned factors that make the cleaning process difficult are environmental issues, excess debris, size parts and materials used. Taking these factors into account for ensuring the quality of the process will determine the quality of the remanufactured product [63]. Indeed, the cleaning stage simplifies the inspection phase for detecting cracks, abrasion marks, and wear. Several cleaning methods in aviation industry, such as organic solvent cleaning technology, jet cleaning technology, thermal cleaning, ultrasonic cleaning technology, or electrolytic cleaning technology, allow the removal of

dirt, residues, grease, deposits, rust, or surface contaminants. Thus, selecting materials that can resist damage from these cleaning methods, and optimizing the selection of cleaning methods with compatible materials are decisive. Another solution for upgrading the efficiency of cleaning would be using smooth surfaces and avoid designing shapes or materials that facilitate the accumulation of dirt or residues, such as sharp edges [64]. Finally, the cleaning stage presents environmental and health concerns. The chemical and toxic risks associated with organic solvents, affect worker safety, and have a negative environmental impact. Thus, it will also be necessary to promote worker safety by improving access to components and ensuring that the work environment and ergonomics are suitable [59].

- **Ease of inspection and sorting:** The inspection phase is decisive as it determines which parts should undergo refurbishment. This involves examining failures, such as wear, corrosion, cracks, bent, or burnt [65]. Therefore, access to information, such as material properties, load limits, tolerances, and adjustments is crucial to facilitate inspection and sorting [66]. Additionally, access to areas for testing or measuring geometric dimensions requires materials that can withstand the inspection test phase [40]. In the aviation industry, which is subject to stringent regulations, inspections are particularly relevant and should be carried out meticulously to ensure a proper planning for future activities. Amezcuita et al. [67] emphasized the importance of ensuring product architecture to minimize inspection and sorting time, thereby reducing workload and costs. This is particularly significant in the context of aviation, given the size and complexity of aircraft structure. To simplify sorting process, it is advantageous to reduce the overall number of components, decrease component variety, and prioritize standard components or those serving similar functions, or are grossly different [59], [66], [129].
- **Ease of repairing and reconditioning:** The repair or reconditioning stage involves addressing only the defective components requiring repair, correction, or refurbishment [44]. Depending on the extent of the defects, components may require minor or major repairs. There are four methods to recondition a component: removing surface and shape defects using subtractive machining processes, adding material and deposition through additive manufacturing, restoring materials and their properties, and finishing surfaces. Rahito et al. [47] discussed the potential of using metal deposition additive manufacturing

for refurbishing turbine blades of aircraft components. This approach offers several advantages, such as the ability to reconstitute components by adding only necessary materials, the fast production time, and reduced replacement costs. Metal deposition additive manufacturing precisely repair used turbine blades that ensures their certifiability and optimal performance. The objective of this stage is to restore the original functions of the components and minimize interchangeable parts [63]. By anticipating failures, isolating components prone to failure, and facilitating access to them, the work is made easier [59]. These components must be durable, otherwise, the production costs of a new product would be lower than a remanufactured one. This is expressly critical in the aeronautical industry due to the significant operating costs involved. It is essential to standardize processus to ensure that parts comply with required standards [44], thereby enabling remanufactured aircraft to take flight.

- **Ease of testing and certification:** The testing phase, despite requiring additional costs, energy, and resources, serves to evaluate the performance and suitability of the product for its second life. This stage is particularly critical in aeronautical sector due to restrictive error margins and reliability requirements [68]. The aeronautical industry is vigorously connected with governmental and international regulations. The aircraft has to meet the specifications imposed by strong major authorities [33]. Depending on where aircraft are manufactured, each has to meet the specifications imposed by the European Union Aviation safety Agency (EASA) or the Federal Aviation Administration (FAA). These major authorities collaborate with the International Civil Aviation Organization (ICAO), a United Nations agency involved in developing industry aviation standards [41]. Other influential organizations also play a key role in the aviation industry. The Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA), a non-profit organization, accredits manufacturers for environmentally friendly and safety practices. AFRA accreditation ensures that EOL aircraft comply with strict environmental and safety protocols [69]. The International Air Transport Association (IATA) provides documents to assist aircraft owners, airlines, designers, and manufacturing or remanufacturing staff to adopt practices for a better governance of the aviation industry. For instance, IATA developed Best Industry Practices for Aircraft Decommissioning (BIPAD), outlining activities to adopt for aircraft reaching EOL. The document promotes sustainable practices for each EOL stage, taking into account

technical, environmental, economical, social, and legal aspects [70]. For instance, to measure environmental impact, greenhouse gas emissions and energy consumption are evaluated [71]. Thus, major authorities ensure that sustainable recommended practices are adopted for facilitating aircraft certification. Additionally, quality management standards, such as AS9100/EN9100 and ISO14000 play an essential role, providing rigorous structured and effective management, ensuring process compliance, product quality, and environmental impact reduction. Adopting these standards enhances aviation companies' reputation and stakeholder confidence, reduces operational mistakes, and guarantees reliable and sustainable aircraft.

- **Reverse logistics efficiency:** Generally, studies are conducted to enhance the efficiency of internal logistics, aiming to determine the suitable mode of transport to move parts from a starting point to a final destination within a facility. Some components with specific geometric characteristics like aircraft wings, require appropriated transport conditions to avoid damage during transportation [63]. The location of facilities also plays an important role, as it necessitates perfectly orchestrated planning considering transport time, labor costs, taxes, and the geopolitical situation of the country where facilities are located [82]. Acquiring EOL aircraft raises additional challenges that include uncertainties about fluctuating demand, the quantity and quality of parts, and components availability [82]. To address these uncertainties, it is needed to establish clear contracts between owners, airlines, and remanufacturers, preserving the aircraft in good condition and making it sufficiently suitable for remanufacturing. The use of cashback system can encourage aircraft returns, and maintaining a safety inventory is also recommended [130]. Thus, the efficiency of reverse logistics relies on rigorous planning, the use of appropriate transports modes, and the adoption of strategies that support reverse logistics.
- **Feedback:** In the context of lean improvement of remanufacturing [52], various data can be extracted to understand the obstacles. This data may concern the performance and efficiency of remanufacturing activities, team productivity, component quality, and customer feedback which remain a top priority [81]. Several obstacles hinder these activities, such as a lack of awareness, knowledge, and motivation, and insufficient organizational structures that promote remanufacturing. Managerial decisions, and regulations and legal constraints influence also information feedback [81], [131]. To state

these shortcomings and overcome these barriers, Lindkvist Haziri et al. [81] have proposed several solutions focused on improving feedback loops, or develop practices in response to extracted data [44], [81], [131], [132], [133]. By giving greater emphasis to remanufacturing and its performance, these feedback are valuable for improving the Design for remanufacturing.

5.2.2.2 Impact of Design for remanufacturing on remanufacturing

It is undeniable that Design for remanufacturing has a significant impact on remanufacturing performance. Östlin et al. [72] pointed out that a higher level of wear and damage necessitate more costly process techniques, which is why from a technical standpoint, DfRem promotes the design of products specifically tailored for remanufacturing by emphasizing their sustainability and the ability to withstand multiple life cycles. DfRem also optimizes operation through the use of suitable technologies and tools, thereby simplifying each stage of remanufacturing process [73]. From an environmental perspective, DfRem encourages resources and components reuse. Unlike recycling, remanufacturing typically retains the original geometrical characteristics hence it minimizes the need for additional resources and reduces greenhouse gas emissions. This stimulates the creation of a high-quality ecosystem focused on environmental sustainability [74]. By reducing the use of virgin resources, the production of new components declines and it leads to lower total acquisition costs and operational expenses [75].

Design for remanufacturing, as a pivotal role in the aviation industry, addresses key challenges in remanufacturing, environmental impact, regulatory compliance, and societal concerns. DfRem focuses on designing aircraft parts to enable easier decommissioning, disassembly, cleaning, inspection and sorting, refurbishment, and testing and certification. In this way, DfRem allows the development of new refurbishment techniques like metal deposition additive manufacturing [47] which demonstrates innovative approaches to extend component life. DfRem also scrutinizes product features like materials which are crucial due to their material properties and compliance with regulations. Lee and No [79] highlighted the challenge of identifying suitable materials to enhance aircraft performance while respecting safety constraints. In response to various fire incidents in the past, Lyon [80] conducted a comprehensive review of the different types of materials used in different aircraft, modern testing methods, and the requirements related to their flammability. This study contributes valuable insights into the diverse range of materials explored

in aviation and rigorous testing protocols to mitigate fire risks effectively and ensure compliance with safety standards. Moreover, from a legislative perspective especially in aeronautical industry, compliance with laws and regulations is essential to establish total confidence in products. This guarantees a reliable market with continually increasing sales forecasts [73]. Finally, in terms of social aspects, DfRem focuses on worker safety and positive working conditions [76]. Remanufacturing also creates new job opportunities and promotes the development of new operational techniques, specialized skills, and knowledge [77].

5.2.3 Quality Function Deployment

In the pursuit of enhanced remanufacturability and the effective reintegration of EOL aircraft into the value chain, designers face a critical challenge: selecting the most suitable design from a multitude of possibilities. The QFD approach, a versatile decision-making tool, emerges as a promising solution. Renowned for its ability to prioritize product-related criteria in alignment with customer needs, Due to its flexibility, the QFD approach makes it well-suited to tackle the complex, multidimensional nature of design decisions in the context of remanufacturing [8]. By facilitating optimized prioritization, the QFD approach can guide designers towards choices that not only meet customer expectations but also maximize the potential for successful component recovery and reuse.

5.2.3.1 Conventional use of Quality Function Deployment

A plethora of eco-design tools are available to help designers design products while minimizing their environmental impact. However, the emergence of sustainable issues and consideration of the three pillars of sustainability are leading designers to rethink their use of eco-design tools. As the world prepares for a transition to a more circular society, Soh and Wong [83] explained the potential innovations of eco-design tools and customer involvement in the product design phase. They pointed out that the use of more advanced eco-design tools enables the improvement of manufacturing techniques, a more sustainable production, and an eco-friendlier standardized operation. This, in turn, highlights competitive advantage in lowering costs, neutralizing threats and achieving sustainable goals [83]. The first eco-design tools were based on lists or tables for identifying hot spots [84]. Royo et al. [85] have listed all the eco-design tools used in the literature, including the Quality Function Deployment approach, which will be studied in this paper.

Traditionally, the QFD approach was used to identify and prioritize product features based on customers' preferences. This enabled designers to plan production more effectively [8]. Han et al. [86] illustrated the classic QFD methodology. They presented a House of Quality (HoQ) matrix that describes the level of relationship between technical attributes and customers' requirements, using linguistic variables often represented by: "Strong", "Medium" and "Weak". To quantify these three variables, each is associated with a crisp value. Thus, for each technical attributes, it is possible to know the total sum and its priority rank. They applied this methodology to a household steam iron and alleged that this approach enabled them to satisfy customers. But it has to be said that the use of QFD is becoming progressively derivative. Indeed, Delgado-Hernandez et al. [87] illustrated another example of the QFD use in the construction industry. In their example, requirements are weighted according to their importance to customers in order to gain viability and get closer to reality.

With the advent of sustainable development issues and the circular economy concept, the traditional QFD model needs to be improved in order to meet these expectations. A number of articles proposing derived methods have been published in the literature. Zhang [88] presented in his paper a QFD for Environment, a green approach that incorporates the findings results of life cycle analysis. Rather than listing all the product features, Wang et al. [134] focused mainly on those that are environmentally relevant. Siwiec et al. [89] proposed a QFD-CE approach that considers, in addition to customers' requirements, requirements related to circular economy. Thus, the authors modified the HoQ matrix by integrating two floor for considering them, the one for customers' requirements and the other for circular economy's requirements. As for Masui et al. [135], the authors have proposed a four-phase approach. This includes considering design specifications, part characteristics, manufacturing operations and production requirements. By scrutinizing each stage of product's life cycle, designers can identify opportunities for improvement and implement strategies that not only reduce environmental impacts but also enhance product performance and longevity. In order to improve this four-phase approach, Romli et al. [110] integrated in the methodology, production and environmental costs for addressing sustainable development.

While the QFD approach was initially used to enhance environmental and economic impact of product design, the tool is progressively finding utility in diverse contexts, such as remanufacturing. Rawariya [95] adopted the conventional use of QFD, employing a case study

within the automotive industry. In the case study, the author focused on aligning customers' requirements with technical attributes that improve remanufacturability. Finally, the author demonstrated the utility of QFD in enhancing product design for remanufacturing. Chen et al. [96] focused on the cleaning process, which is a crucial step in the remanufacturing process. By employing the Quality Function Deployment framework, the authors integrated customers' needs with the functional characteristics specific to cleaning. This approach enhances the effectiveness and efficiency of the cleaning process, consequently leading to improved overall quality of remanufactured products. Armacost et al. [97] and Yüksel [98] have gone one step further. Their work is characterized by their desire to improve the remanufacturing process, with each conducting an automotive case study. Armacost et al. focused on automotive starters, whereas Yüksel investigated automotive engines. The authors were particularly interested in Design for remanufacturing and aimed to identify design requirements that enhance the remanufacturing process and better meet customers' needs. This targeted approach intends to optimize product design to facilitate remanufacturing, ultimately extending the product's lifespan and reducing environmental impacts.

5.2.3.2 Fuzzy Quality Function Deployment

It becomes apparent that the QFD approach can integrate a varied range of complementary approaches, such as life cycle assessment or life cycle costing. However, beyond these conventional methods, an emerging and promising approach involves incorporating fuzzy logic techniques. Bevilacqua et al. [90] conducted their research in supplier selection using QFD as a guiding framework. Its central approach is the utilization of triangular fuzzy numbers, a methodology that involves using a triplet of numbers and fuzzifying linguistic variables pertaining to the essential characteristics of products or services procured from suppliers. The authors also extended this fuzzification to encompass the relationship between these characteristics and criteria used for assessing suppliers in the HoQ matrix relationship. By integrating fuzzy logic techniques within the QFD framework, Bevilacqua et al. [90] aimed to enhance the supplier selection process by accommodating uncertainties and complexities present in supplier evaluation and decision-making. Lin et al. [91] and Tsai et al. [136] introduced another way of fuzzifying relationships in the HoQ matrix and weighting customers' needs. Both authors adopted fuzzy trapezoidal numbers, a quadruplet of numbers, as a refined alternative to the triangular fuzzy numbers. Lin et al. [91] established fuzzified relationships between customers' needs and technical attributes. They

conducted a case study on digital cameras that showcases the subtle difference between traditional QFD and their methodology, and underlines the flexibility and nuanced insights his approach offers. Tsai et al. [136] used the application of Fuzzy QFD to optimize manufacturing planning by implementing fuzzified relationships between functional strategies and business strategies. This fuzzy nature is essential as it takes into account varied perceptions of managers involved in decision-making processes for ensuring a more comprehensive approach. Similarly to traditional QFD, sustainable criteria are increasingly used to address emerging challenges for a more sustainable world. Sousa-Zomer and Miguel [92] developed a sustainable Product-Services-System approach. They focused on various service aspects, such as post-sales support, maintenance, customer care, or product assistance. By leveraging triangular fuzzy numbers, they set relationships between requirements and various service proposals in three distinct matrices according to economic, environmental, or social context, thus covering the three pillars of sustainability. In addition, they used the fuzzy Analytical Hierarchy Process to weigh requirements that enables a nuanced evaluation process that accommodates uncertainties inherent in decision-making. To illustrate the effectiveness of their approach, the authors presented a case study centered around bike-sharing. Kuo and Hsin-Hung [93] aimed to develop a product by aligning its most pertinent technical attributes from the entire life cycle of the product with customers' requirements. This approach enables the analysis of critical points in each phase of the product's life cycle, facilitating the reduction of both environmental and economic impacts. They used the principle of triangular fuzzy numbers within the HoQ matrix and for weighting customers' needs. Their case study focused on toner cartridges for printers, providing a concrete example of their methodology. The latter allows for a comprehensive evaluation, ensuring that the product design addresses diverse requirements while minimizing negative consequences throughout its life cycle. Kuo and Hsin-Hung [93] suggested integrating environmental considerations into product development processes. Operating by the principle of fuzzy logic, similar to the previous study, they incorporated an additional layer in the HoQ matrix specifically dedicated to environmental requirements. The modification reinforced the alignment between customers' needs, environmental considerations, and technical attributes, thereby facilitating the development of more sustainable products. Kuo et al. [137] emphasized on sustainability in product and development practices, and used the same previous case study for supporting their methodology. While previous authors focused primarily on environmental or economical impacts, Lee and Park [94] paid particular

attention to social aspects, especially worker safety. In their case study, they settled relationships between construction activities and their associated risks and consequences. Furthermore, these relations are fuzzified with the same application of triplet of numbers. Through their paper, the authors pointed out the importance of addressing social considerations in construction projects, thus contributing to a safer and more sustainable practices in the construction industry.

Finally, some papers have investigated the remanufacturability of products, taking uncertainties into account, or have developed a methodology based on a fuzzy QFD approach for remanufacturing product. In a automotive case study, Yang et al. [99] addressed the fuzzy integration of remanufacturing characteristics in the initial design stage and emphasized product features that improve the remanufacturability of products. Zhang et al. [65] have also identified product features in the same spirit of improving remanufacturability. Their methodology comprises two phases. Initially, the authors established correlations between failure modes and technical attributes. Then, these technical attributes are linked to remanufacturing characteristics. Each relationship is expressed by a triangular fuzzy numbers. A case study focused on engine crankshafts for elucidating their approach. Previous studies emphasized product remanufacturability by prioritizing technical attributes. However, it is also possible to use QFD for selecting the optimal remanufacturing process. For instance, Shi et al. [100] utilized the FMEA method to identify failure modes for each alternative remanufacturing steps and assigned coefficients to weight them accordingly. Then, they incorporated triangular fuzzy numbers into the relationship matrix to determine the most appropriate remanufacturing process scenario. Their automotive case study, focusing on heavy-truck engine, validated this methodology. Likewise, Jiang et al. [101] aimed to identify the best remanufacturing process scenario. Unlike previous authors, they did not implement Triangular Fuzzy Numbers in the QFD approach. Instead, they used fuzzy Linear Regression within the HoQ matrix to estimate relationships. They applied the methodology in a case study involving the remanufacture of a lathe. In their study, five process quality characteristics for the lathe, including surface cleanliness, hardness, precision retention, straightness, and parallelism were compared with three primary criteria including time, cost, and reliability and three alternative process plans. Finally, the fuzzy Linear Regression estimated functional relationships between these criteria and characteristics. In this situation, the fuzzy Linear Regression is a valuable tool in comparison with Traditional Linear Regression which its approach is inadequate due to uncertainty, subjectivity, or complexity related to relationships.

5.2.4 Summary and synthesis of the literature

To summarize the literature review section, the concept of remanufacturing and its relationship with the circular economy were explored, along with the state of the art of remanufacturing in the aviation industry. Attention was given to the characteristics of Design for remanufacturing in order to establish a guideline for remanufacturing aircraft and helping designers to enhance remanufacturability. Several decision-making tools have been highlighted, and it appears that various Quality Function Deployment approaches have been conducted, with case studies illustrating their utility.

To review the literature on different QFD approaches, several gaps and trends are identified. Initially, traditional QFD prioritized technical attributes based on customers' needs and gradually integrated sustainability parameters, particularly environmental and economic considerations. However, the social dimension has been often overlooked in the framework. Moreover, noticeable trends towards derivative QFD approaches emerged, such as modifying the House of Quality matrix by adding another stage, assessing a product's life cycle, or fuzzifying relationships and weights.

In the traditional QFD approach, the weighting of needs according to the nature of the cases is not systematically carried out, raising questions about the accuracy of the representation of these needs. The weighting often relies on the discretion of a panel of concerned individuals, whether they are customers or stakeholders inherent to the case study. However, ensuring that this weighting accurately reflects the wishes and priorities of these groups is a challenge. Indeed, some requirements may be perceived as more important than others, and panel members may have divergent opinions, making it difficult to correctly weight these requirements to fully satisfy all stakeholders in the case study. To overcome these challenges, it is essential to develop robust methods for need weighting. The integration of fuzzy logic techniques would better manage divergent opinions and uncertainties, offering a more nuanced and precise approach. Despite the preeminence of triangular fuzzy numbers application, the use of trapezoidal fuzzy numbers remains uncommon, presenting an opportunity for further exploration and comparison of their efficiency. While some remanufacturing case studies exist, especially within the automotive industry, there is a prevalent spotlight either on improving remanufacturability through technical attributes or selecting the optimal remanufacturing process, often neglecting environmental and social criteria.

Finally, the approach proposed in Section 5.3 appears to be a methodology tailored for the aviation industry, as it provides a guideline to help designers be advised with DfRem for aircraft. Additionally, the novel QFD approach seems well-suited because it better addresses stakeholders' requirements, considers circularity issues and explores alternative fuzzy logic, such as trapezoidal fuzzy numbers which offer greater flexibility and precision in the decision-making phase.

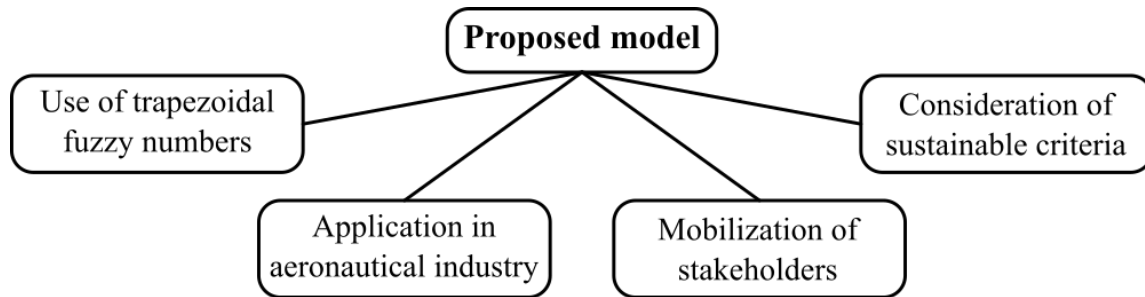


Figure 5.2 Contributions of the proposed model

5.3 A proposed approach

In this section, a process mapping is proposed to visualize and reinforce understanding of workflow dynamics, interactions among different remanufacturing activities, and stakeholders' involvement within the aeronautical industrial system. Building upon a comprehensive understanding of the subject gathered in Section 5.2, a guideline for aircraft parts remanufacturing is introduced. Then, the Fuzzy Sustainable Quality Function Deployment approach is presented for classify product features and sustainability criteria based on the remanufacturability requirements identified in the guideline.

5.3.1 Process mapping

While Airbus developed PAMELA to enhance EOL aircraft management, it was primarily designed for material reuse and recycling, neglecting the remanufacturing strategy [138]. Based on the literature review and deductions from other industries like automotive, this section proposes a multilayered mapping of the remanufacturing process for the aeronautical industry. It describes material flows between each stage, where legislations are applied, and informational flows and feedback among stakeholders. Actually, four key stakeholders in this context are identified. Firstly, the Original Equipment Manufacturer (OEM) occupies the main manufacturing chain, and is responsible for designing, manufacturing, and supplying components and parts that are integrated

into the final product. OEM collaborates with aircraft owners or airlines technical departments [139]. In aviation, the term “Overhaul” is commonly used instead of “Remanufacturing”, and this process is generally managed by Maintenance, Repair, Operation (MRO) or airlines technical departments. However, subcontractors are sometimes called because of their expertise in a particular activity, in order to meet deadlines, or for saving costs, that involves 3rd party remanufacturers [44]. Their goal is to refurbish EOL aircraft and restore them to flight-worthy condition. Customers’ satisfaction is crucial, involving owners and airlines, as they must also satisfy their customers for the benefit of their organization and comply with legislations. Owners and Airlines customize aircraft according to the preferences, operate flights, and decide whether to retire their aircraft. Finally, landfill and incinerators owners manage waste disposal while following legislations. To ensure effective design and optimization of remanufacturing processes, each stakeholder provides feedback to designers. The latter are able to achieve optimal aircraft design outcomes thanks to a comprehensive understanding of the global closed-loop system. Figure 5.3 illustrates the overall process mapping. While Figure 5.4 depicts the remanufacturing process in general, Figure 5.5 provides a detailed view of decommissioning and disassembly process. Lastly, Figure 5.6 describes the design phase process and how DfRem is integrated.

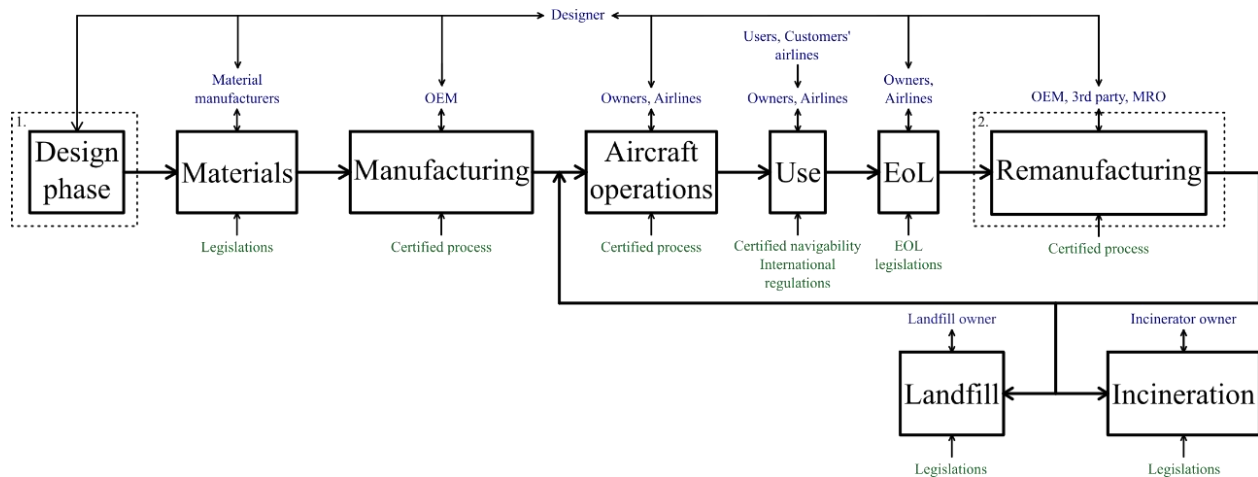


Figure 5.3 General process of remanufacturing in aeronautical industry

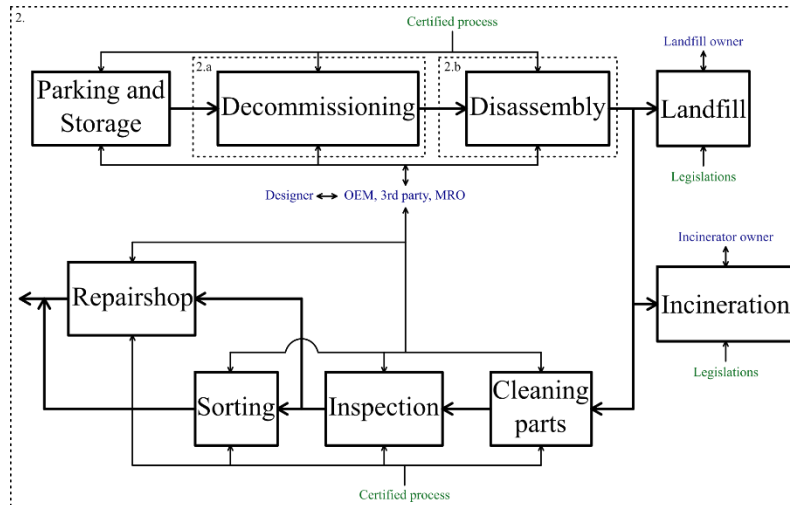


Figure 5.4 Detailed process of remanufacturing

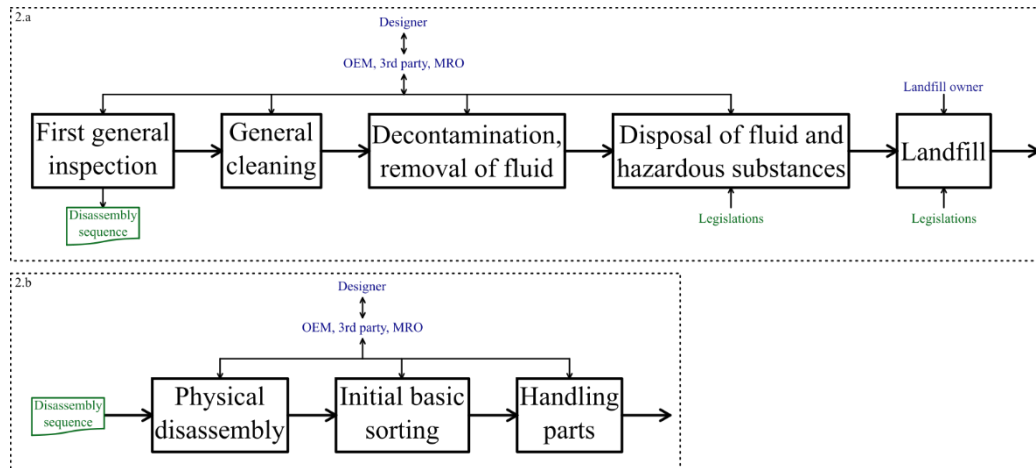


Figure 5.5 Detailed process of decommissioning and disassembly

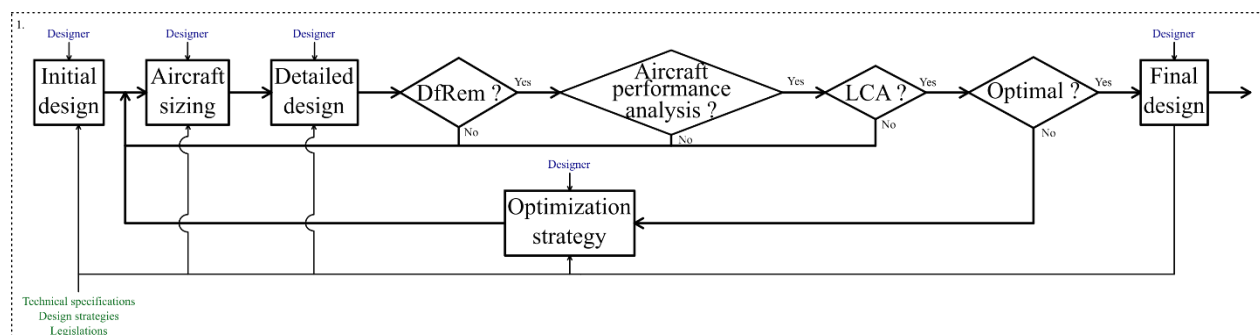


Figure 5.6 Detailed process of design phase for remanufacturing

5.3.2 Design for remanufacturing guideline

While the objective is to provide a structured framework for enhancing the remanufacturability of aircraft, a Design for remanufacturing guideline, specifically tailored for the aviation industry, is developed. The DfRem guideline summarized in Table 5.1, encompasses various critical aspects inherent to successful remanufacturing process. It recommends specific product features as well as sustainable considerations and strategies for each remanufacturing activity (e.g. ease of decommissioning, ease of disassembly, ease of cleaning, ease of inspection and sorting, ease of repairing and reconditioning, ease of testing and certification, reverse logistics efficiency). These recommendations align with performance requirements and achieve sustainability goals.

Table 5.1 DfRem for aircraft guideline

Process activities		Technical/Engineering attributes	Sustainable considerations
Ease of decommissioning		Conceive a specific structure that simplifies fluid release	Optimize release time Fluid can be reused multiple times Set strict protocols and instruction to follow to avoid chemical risks
Ease of disassembly		Use materials that can survive the disassembly stage Privilegiate the same material between fasteners and parts Privilegiate non-destructive disassembly using appropriate assembly methods Decrease the complexity of disassembly by arranging appropriately Reduce the number of components and joints Standardize and reduce different disassembly techniques to gain time operation	Limit the use of hazardous substance Optimize operation for limiting the use of energy Use safety practices to avoid physical injury risks and prevent stressful workload
Ease of cleaning		Use materials that withstand damages caused by different cleaning methods Avoid materials that are difficult to clean Minimizing different materials limits the use of various cleaning methods Ensure access to all areas to be cleaned Conceive convenient shapes and surfaces that avoid the accumulation of dirt or residues Ensure ease of handling parts that have to be cleaned	Avoid hazardous cleaning agents Limit the use of different cleaning agents Avoid chemical injury risks Set strict protocols and instructions to follow
Ease of inspection and sorting		The materials are easily identifiable Reduce the number of material type Use materials that withstand damages cause by different inspection test Ensure access to inspection points Parts are clearly marked Ensure access to information of parts for facilitating inspection and sorting, and for anticipating failures Reduce number of parts Reduce redundant part for limiting operation time Use standard components for limiting sorting complexity Anticipate tools for sorting products	The inspection stage, when a tool or a chemical agent is required, must be safe Avoid physical and chemical injury risks by using appropriate tools
Ease of repairing and reconditioning		Use materials that are able to recover their properties despite the imperfections detected during the inspection phase Anticipate failures and make parts that are prone to damage accessible Minimize redundant parts Minimize interchangeable parts by using standard parts	Interchangeable parts are as durable as components that can not be remanufactured Parts that can not be remanufactured are at least recyclable Ensure strict compliance with protocols to avoid accident Limit energy consumption
Ease of testing and certification		Use non-destructive testing methods to verify performance, even of internal components Minimize bulky product handling for testing Make testing phase less complex and standardize tests	Make environmentally friendly and safe tests that avoid physical and chemical injury risks Limit energy consumption
Reverse logistics efficiency		Use appropriate mode of transportation depending on geometric characteristics and properties of products for avoiding damage Prepare a realistic planning that also considers uncertainties like fluctuating demand, the quantity, the quality, and the availability of parts	Optimize transportation of products for minimizing costs, energy consumption, greenhouse gas emissions, and working time

5.3.3 Fuzzy Sustainable QFD methodology

5.3.3.1 Concept of fuzzy logic set

Zadeh [9] introduced the concept of fuzzy logic in order to model the uncertainties involved in making decisions. This paragraph defines this concept in the following way. Let Ω be a set of real numbers, and A a fuzzy subset of Ω and characterized by a membership function λ_A . The monotonic function, defined by $\lambda_A(x): \Omega \rightarrow [0,1]$, associates with each element of x in Ω , a number $\lambda_A(x)$ in the interval $[0,1]$ which represents the grade of membership of x in A . Finally, the larger the number $\lambda_A(x)$ is, the stronger degree of membership x in A is. The fuzzy logic can be generalized by the following equation (1):

$$\begin{cases} \lambda_A(x) = 1, & \text{if } x \text{ is totally in } A \\ \lambda_A(x) = 0, & \text{if } x \text{ is not in } A \\ 0 < \lambda_A(x) < 1, & \text{if } x \text{ is partially in } A \end{cases} \quad (1)$$

In this paper, the fuzzy subset $A = (\alpha, \beta, \gamma, \delta)$ represents a trapezoidal fuzzy number as illustrated in Figure 5.7 when its membership function is defined by (2).

$$\lambda_A(x) = \begin{cases} 0 & x \leq \alpha \text{ or } x \geq \delta \\ \frac{x - \alpha}{\beta - \alpha} & \alpha \leq x \leq \beta \\ 1 & \beta \leq x \leq \gamma \\ \frac{\delta - x}{\delta - \gamma} & \gamma \leq x \leq \delta \end{cases} \quad \text{with } \alpha \leq \beta \leq \gamma \leq \delta \quad (2)$$

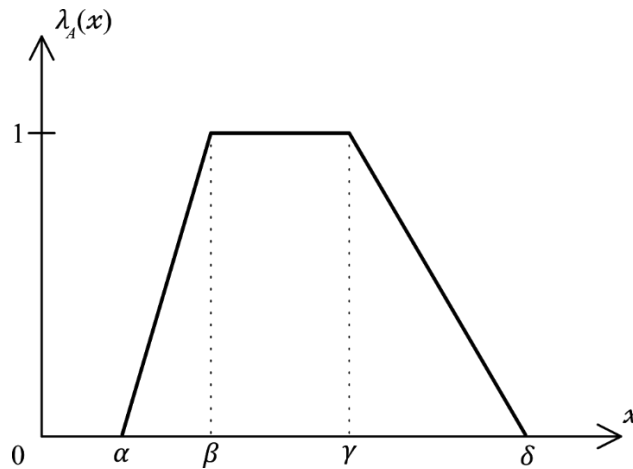


Figure 5.7 Trapezoidal membership function

5.3.3.2 Linguistic variables

The QFD principle is essentially based on subjective judgements. Hence, linguistic variables are introduced to quantify these interpretations. However, due to the diversity of individual perspectives and interpretations, these assessments inevitably lead to uncertainties as to the reliability of the results obtained. It is precisely to compensate this variability that linguistic variables are made up of a quadruplet of numbers.

In this paper, two linguistic variables are suggested: I = "Importance" and R = "Relation". The first one describes the level of stakeholder importance attached to requirements. The other one describes the relationships between attributes and requirements. Figure 5.8 illustrates the universe of each linguistic variable, which are defined as follows with their quadruplet of numbers.

$$\Omega_I = \{\text{"Very Low"}; \text{"Low"}; \text{"Medium"}; \text{"High"}; \text{"Very high"}\}$$

$$\Omega_R = \{\text{"Very weak"}; \text{"Weak"}; \text{"Medium"}; \text{"Strong"}; \text{"Very strong"}\}$$

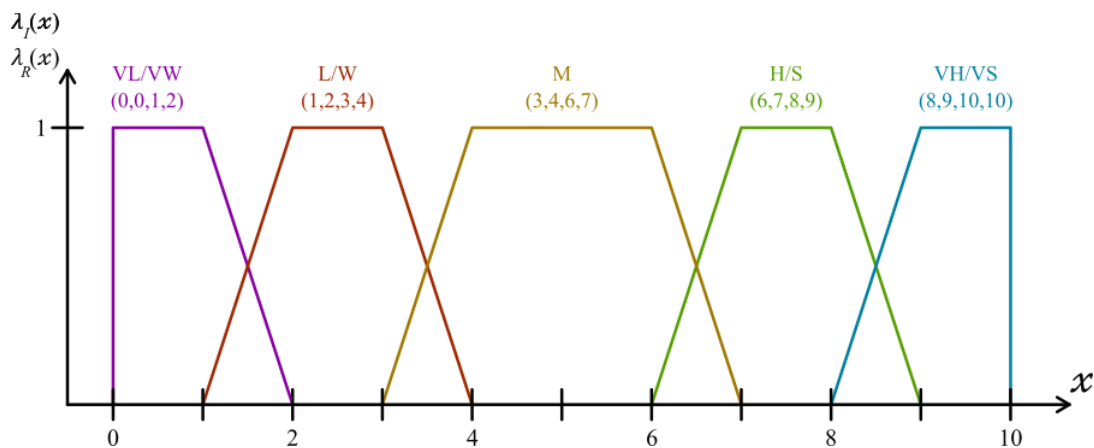


Figure 5.8 Linguistic variables and their corresponding quadruplet of numbers

5.3.3.3 Fuzzy Sustainable QFD approach

The Fuzzy Sustainable QFD methodology proposed in this paper is based on the following steps:

Step 1: Identify the requirements, technical attributes and sustainable criteria of products depending on the context of use within the Fuzzy Sustainable QFD framework.

Step 2: Determine the degree of membership included in Ω_I that stakeholders assign to each requirement. These degree of importance are then fuzzified and represented by a quadruplet of

numbers defined by $\varphi_i^s = (a_i^s, b_i^s, c_i^s, d_i^s)$, where i represents the i^{th} requirement out of the n total, and s , the s^{th} stakeholder out of the m total. The average trapezoidal fuzzy number for each requirement is then calculated and follows the equation (3):

$$\phi_i = \left(\frac{1}{s} \sum_{l=1}^s a_i^l, \frac{1}{s} \sum_{l=1}^s b_i^l, \frac{1}{s} \sum_{l=1}^s c_i^l, \frac{1}{s} \sum_{l=1}^s d_i^l \right) \quad (3)$$

Step 3: Determine the level of relationship between attributes and requirements, this time using the Ω_R universe. The quadruplet of numbers will be denoted ψ_{ij} where i is the i^{th} requirement and j , the j^{th} attribute.

Step 4: Once the correlations have been established, the resulting score F_j for each attribute j , is determined according to equations (4) and (5).

$$T_{ij} = \phi_i \otimes \psi_{ij} \quad (4)$$

$$F_j = \sum_{i=1}^n T_{ij} \quad (5)$$

At the end, a fuzzy score is obtained, which has to be defuzzified and ranked according to their final score. Below are details of the various arithmetic operations that can be applied to quadruplet of numbers, $M_1 = (a_1, b_1, c_1, d_1)$ and $M_2 = (a_2, b_2, c_2, d_2)$, and k a real number.

Addition ($M_1 \oplus M_2$):

$$(a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2, d_1 + d_2) \quad (6)$$

Substraction ($M_1 \ominus M_2$):

$$(a_1 - a_2, b_1 - b_2, c_1 - c_2, d_1 - d_2) \quad (7)$$

Multiplication ($k \otimes M_1$):

$$(ka_1, kb_1, kc_1, kd_1) \quad (8)$$

Multiplication ($M_1 \otimes M_2$):

$$(a_1 a_2, b_1 b_2, c_1 c_2, d_1 d_2) \quad (9)$$

Division ($\frac{M_1}{M_2}$):

$$\left(\frac{a_1}{a_2}, \frac{b_1}{b_2}, \frac{c_1}{c_2}, \frac{d_1}{d_2} \right) \quad (10)$$

Step 5: At the end, a fuzzy score is obtained for each attribute indicating the degree of requirements. These fuzzy scores will be defuzzified by using the center of gravity (COG), one of the most common techniques for defuzzification, as described in (11), in order to obtain a crisp value. Once the values are obtained, they are ranked in descending order. The higher the score, the more important degree, and the concerned criterion should be more considered.

$$\frac{\int \lambda_A(x) \cdot x \, dx}{\int \lambda_A(x) \, dx} \quad (11)$$

5.4 Application

5.4.1 Background

The application of Fuzzy Sustainable QFD means an advancement in addressing gaps related to sustainable product development and decision-making processes. The methodology is proposed due to the complex and multidimensional nature of sustainability considerations within the aeronautical industry. The need to optimize sustainable aircraft design, requires a comprehensive approach that integrates fuzzy logic with QFD principles. The aim of Fuzzy Sustainable QFD is to determine which criteria and/or features should be prioritized to enhance the remanufacturing process and the remanufacturability of products, especially aircraft. To validate the methodology, the paper proposes an application example on a wing of the Airbus A350 aircraft. This case study is selected because it represents a part of the aircraft that is well-suited for remanufacturing. Specifically, the modular nature of wing (e.g. flaps, spoilers, winglets, slats, ailerons, leading edges, droop nose, and trailing edges [140]) is closely aligned with the benefits of remanufacturing. These components offer potential for disassembly, flexibility for refurbishment and replacement of individual parts without replacing the entire wing, and adaptability to integrating new technologies without compromising product function. Moreover, the manufacturing costs associated with structural parts are notably higher compared to engines, avionics, landing gear, or cabin equipment [141]. Therefore, focusing on wing remanufacturing in this application example can provide valuable insights and recommendations for optimizing the remanufacturing process of aircraft wings. The application of this methodology is familiar with authors' judgement and industry experience, and insights suggested by the literature and case studies from other industries. It focuses on optimizing the design of a wing aircraft for remanufacturing, considering sustainable criteria and technical attributes.

5.4.2 Results

First of all, Section 5.2 enables to list different strategies and parameters that affect remanufacturability of aircraft. Then, by following the steps outlined in Section 5.3.3, the initial step is to enumerate requirements for remanufacturability, and the diverse product features and sustainable criteria.

Table 5.2 illustrates the varying degrees of importance assigned by these four stakeholders through linguistic variables within Ω_I for each requirement. These linguistic variables are then fuzzified, and each requirement has a quadruplet of numbers calculated from the average of each importance given the stakeholders. The average weight of each requirement is given in Table 5.3.

In the HOQ matrix, the relationship levels between criteria/features and requirements are defined by using linguistic variables from Ω_R , which are then fuzzified. Table 5.4 displays the defined criteria and attributes along their relationship levels with different requirements. Afterwards, by following the arithmetic operations outlined in the methodology, the final fuzzy scores are collected. Then, their crisp value is obtained through defuzzification, allowing the classification of different criteria and attributes showed in Table 5.5.

Deductions made from Section 5.2, along with hypothetical interpretations, and the authors' judgement, led to the identification of the top three prioritized product features and sustainable criteria to enhance remanufacturability in the context of circular economy: "Operational time", "Material", and "Operator's workload". The ranking of other criteria and product features are indicated in Table 5.5. It is evident that economic aspects are highlighted, given the operational time's cost implications. As noted by Gantois and Morris [141], manufacturing operations account for 60% of total costs for a wing aircraft, with half of this attributed to assembly process. This underlines the importance of optimizing remanufacturing activities, such as eliminating unnecessary operations, or standardizing procedures to reduce costs and enhance efficiency. As the social criterion "Operator's workload" is also highlighted, it confirms the interest of the model to integrate sustainable criteria.

Table 5.2 Importance degree of each requirement according to stakeholders

Requirements	OEM	MRO, 3rd party remanufacturers	Owners, Airlines	Landfill and incinerator owners
Ensuring the possibility of dismantling	VH	H	VL	
Ensuring easy access of remanufacturable part	VH	H	VL	
Limit redundant part	VH	H		L
Standardized operation	VH	H	L	
Traceability of operations and parts	VH	VH	M	L
Time for preparation		VH	VL	
Removal fluid time		VH	H	
Avoid chemical risk		VH	M	M
Time for preparation		VH	VL	
Disassembly time	L	VH	L	
Standardized operation	VL	VH	M	
Easy handling	L	H	VL	
Easy access to parts	L	VH	M	
Easy access to joints and fasteners	M	VH	M	
Required tools	H	VH	H	
No damage to other parts		VH		M
Easy access	M	VH	H	
Ease of handling		H		
Avoid dirt accumulation	M	VH	H	
No disturbance to the surface	M	VH	M	
Ensuring efficient cleaning	L	VH	H	
Required cleaning agents		VH	VL	
Easy access and identification	VL	VH	M	
Easy classification and inspection	VL	VH	M	
Ensuring effective inspection	M	VH	H	
Surviving inspection tests	L	VH	M	
Reducing sorting complexity		VH	L	
Standardized components	M	VH	M	
Time for preparation		VH	L	
Parts availability	M	VH	H	
Standardized parts	M	VH	M	
Standardized operation		VH	M	
Easy parts' status identification	L	VH	H	
Allowing internal parts test	L	VH	H	
Reducing test complexity	L	VH	H	
Standardized test		VH	M	
Ensuring that every parts are certifiable	VH	VH	VH	
Securing approval of all major authorities	VH	VH	VH	M
Easy transport of parts	H	VH	H	L
Appropriate mode of transportation	H	VH	H	

Table 5.2 (Suite)

Requirements	OEM	MRO, 3rd party remanufacturers	Owners, Airlines	Landfill and incinerator owners
Costs	VH	VH	VH	L
Demand fluctuation	L	VH	M	H
Less support activity costs	H	H	VH	VL
Less operation activity costs	H	H	VH	VL
Recovery rate	H	H	H	H
Less energy	H	H	VH	M
Less carbon footprint	H	H	VH	H
Less material usage	H	H	VH	M
Recyclable materials	H	H	VH	H
Safety standards	H	H	VH	H
Workers' condition	H	H	VH	H
Eligible parts	L	L	H	VH
Less hazardous wastes	H	H	H	VH
More potentially reusable wastes	M	M	M	VH

Table 5.3 Average weight for each requirement

Requirements associated with DfRem guideline		Requirements' weight
Ease of manufacturing	Ensuring the possibility of dismantling	(3,5 4,25 4,75 5,25)
	Ensuring easy access of remanufacturable part	(3,5 4,25 4,75 5,25)
	Limit redundant part	(3,75 4,5 5,25 5,75)
	Standardized operation	(3,75 4,5 5,25 5,75)
	Traceability of operations and parts	(5 6 7,25 7,75)
Ease of decommissioning	Time for preparation	(1,333 1,667 1,833 2)
	Removal fluid time	(2,333 2,667 3 3,167)
	Avoid chemical risk	(2,333 2,833 3,667 4)
Ease of disassembly	Time for preparation	(1,333 1,667 1,833 2)
	Disassembly time	(1,667 2,167 2,667 3)
	Standardized operation	(1,833 2,333 2,833 3,167)
	Easy handling	(1,167 1,667 2 2,5)
	Easy access to parts	(2 2,5 3,167 3,5)
	Easy access to joints and fasteners	(2,333 2,833 3,667 4)
	Required tools	(3,333 3,833 4,333 4,667)
	No damage to other parts	(1,833 2,167 2,667 2,833)
Ease of cleaning	Easy access to all areas to be cleaned	(2,833 3,333 4 4,333)
	Ease of handling	(1 1,167 1,333 1,5)
	Avoid dirt accumulation	(2,833 3,333 4 4,333)
	No disturbance to the surface	(2,333 2,833 3,667 4)
	Ensuring efficient cleaning	(2,5 3 3,5 3,833)
	Required cleaning agents	(1,333 1,667 1,833 2)

Table 5.3 (Suite)

Requirements associated with DfRem guideline		Requirements' weight
Ease of inspection and sorting	Easy access and identification	(1,833 2,333 2,833 3,167)
	Easy classification and inspection	(1,833 2,333 2,833 3,167)
	Ensuring effective inspection	(2,833 3,333 4 4,333)
	Surviving inspection tests	(2 2,5 3,167 3,5)
	Reducing sorting complexity	(1,5 1,833 2,167 2,333)
	Standardized components	(2,333 2,833 3,667 4)
Ease of repair and replacement	Time for preparation	(1,5 1,833 2,167 2,333)
	Parts availability	(2,833 3,333 4 4,333)
	Standardized parts	(2,333 2,833 3,667 4)
	Standardized operation	(1,833 2,167 2,667 2,833)
Ease of test and certification	Easy parts' status identification	(2,5 3 3,5 3,833)
	Allowing internal parts test	(2,5 3 3,5 3,833)
	Reducing test complexity	(2,5 3 3,5 3,833)
	Standardized test	(1,833 2,167 2,667 2,833)
	Ensuring that every parts are certifiable	(4 4,5 5 5)
	Securing approval of all major authorities	(4,5 5,167 6 6,167)
Efficiency of reverse logistics	Easy transport of parts	(3,5 4,167 4,833 5,333)
	Adapted mode of transportation	(3,333 3,833 4,333 4,667)
	Costs	(4,167 4,833 5,5 5,667)
	Demand fluctuation	(3 3,667 4,5 5)
Costs efficiency	Less support activity costs	(5 6 6,75 7,5)
	Less operation activity costs	(5 6 6,75 7,5)
Environmental efficiency	Recovery rate	(6 7 8 9)
	Less energy	(5,75 6,75 8 8,75)
	Less carbon footprint	(6,5 7,5 8,5 9,25)
	Less material usage	(5,75 6,75 8 8,75)
	Recyclable materials	(6,5 7,5 8,5 9,25)
Social issues	Safety standards	(6,5 7,5 8,5 9,25)
	Workers' condition	(6,5 7,5 8,5 9,25)
Ease of disposal	Eligible parts	(4 5 6 6,75)
	Less hazardous wastes	(6,5 7,5 8,5 9,25)
	More potentially reusable wastes	(4,25 5,25 7 7,75)

Table 5.4 Degree of relationship between requirements and product features and sustainable criteria

		Product features										Environmental criteria				Social criteria			
Requirements associated with DfRem guideline		Size	Shape	Weight	Structure	Material	Number of components	Connection and fasteners	Operational time	Interchangeable parts	Electric and electronic parts	Energy resources used	Green House Gas	Material usage	Wastes	Operator workload	Stress and fatigue	Injury risk	
Ease of manufacturing	Ensuring the possibility of dismantling	L	M	VL	H			VH			H								
	Ensuring easy access of remanufacturable part	VL	L		VH		M	H	L									L	
	Limit redundant part				VL		H	M		H	H								
	Standardized operation								H			H	H	H	M	M	VL	VL	
Traceability of operations and parts										VH	VH								
Ease of decommissioning	Time for preparation								H								L	L	
	Removal fluid time	L	VL		L		VL	VL	H								L	L	VL
	Avoid chemical risk																	M	VH
Ease of disassembly	Time for preparation								H								L	L	
	Disassembly time	M	M	M	H		VH	VH	H		L						H	L	
	Standardized operation								H			H	H	H	M	M	L	L	
	Easy handling	H	H	M	H	L	H	H			M						H	L	L
	Easy access to parts	M	L		H		M	L									L		
	Easy access to joints and fasteners								VH								L		
	Required tools							H	M								L		
	No damage to other parts				L	L			VL									L	VL
Ease of cleaning	Easy access to all areas to be cleaned				H		H	H									L		
	Ease of handling	L	L	M	VL		M	M			L						H		
	Avoid dirt accumulation			VH			VH		H		L	H							
	No disturbance to the surface			VH			VH				L			M					
	Ensuring efficient cleaning				VL		L	M	H					H	M	L	L	M	
	Required cleaning agents					M		VL			M	VL		M	L			L	
Ease of inspection and sorting	Easy access and identification	L	VL		H	M	H	H									L		
	Easy classification and inspection				H	L			H		H						VL		
	Ensuring effective inspection				VL		M	M	L								M	VL	
	Surviving inspection tests					VH					M			M					
	Reducing sorting complexity				M	VH	H	L	M								L		
	Standardized components						H	H		H	H								

Table 5.4 (Suite)

		<i>Product features</i>										<i>Environmental criteria</i>				<i>Social criteria</i>		
Requirements associated with DfRem guideline		Size	Shape	Weight	Structure	Material	Number of components	Connection and fasteners	Operational time	Interchangeable parts	Electric and electronic parts	Energy resources used	Green House Gas	Material usage	Wastes	Operator workload	Stress and fatigue	Injury risk
Ease of repair and replacement	Time for preparation								H	H						L	L	
	Parts availability									VH	VH							
	Standardized parts						L		H	H								
	Standardized operation							H				H	H	H	M	M	L	L
Ease of test and certification	Easy parts' status identification				M		L		M							L		
	Allowing internal parts test	L	L		M													
	Reducing test complexity				M				M							L	L	M
	Standardized test	VL	VL	VL	L	L	H	VL	M			H	H	H		L	L	L
	Ensuring that every parts are certifiable									VH	VH							
	Securing approval of all major authorities	H	H	H	H	L		VL		VH	H							
Efficiency of reverse logistics	Easy transport of parts	M	M	M					L			M				M		VL
	Adapted mode of transportation	M	M	M					L			M				M		VL
	Costs								H			M		M		M		
	Demand fluctuation									VH								
Costs efficiency	Less support activity costs					VH						H		H	M	H		
	Less operation activity costs				VL		M	L	H			H		H	M	H		
Environmental efficiency	Recovery rate					M				H	M		VH		VH			
	Less energy	VL		VL	VL	H	L		M			VH						
	Less carbon footprint	VL		VL	VL	H	L		M				VH					
	Less material usage	VL		VL	VL	H	L			H				VH				
	Recyclable materials					H				L		M	M	M	L			
Social issues	Safety standards	VL	VL	L	VL						VL			H		VH		VH
	Workers' condition								H							VH	VH	VH
Ease of disposal	Eligible parts					H					H				H			
	Less hazardous wastes										L		VH	H	VH			
	More potentially reusable wastes									H	VL		L	VL	H			

Table 5.5 Ranks with different fuzzy sets

	Present method	Refining trapezoidal fuzzy sets	Triangular fuzzy numbers
Size	15	15	15
Shape	14	14	14
Weight	17	17	17
Structure	9	9	9
Material	2	3	3
Number of components	12	10	10
Connection and fasteners	8	7	7
Operational time	1	2	2
Interchangeable parts	4	4	4
Electric and electronic parts	6	5	5
Energy resources used	10	12	12
Green House Gas	11	10	11
Material usage	5	6	6
Wastes	7	8	8
Operator's workload	3	1	1
Stress and fatigue	16	16	16
Injury risk	13	13	13

5.5 Discussion and managerial insights

Section 5.4 provided a comprehensive understanding of methodology's application and the achievable outcomes. However, it is essential to acknowledge that aircraft remanufacturing still faces challenges and uncertainties due to EOL quality variability, unpredictable outcomes, and components' residual value. It depends on owners and airlines' decision to retire aircraft and initiate decommissioning phase. The remanufacturing also involves dealing with potential failures that lead to additional operations, extended work hours and additional costs.

The use of trapezoidal fuzzy numbers in QFD appears suitable for addressing these uncertainties. The flat top distribution can model uncertainties where crisp values are not given but estimated within intervals. A narrow interval reflects higher designer confidence, whereas wider intervals indicate persistent uncertainties. It is therefore essential to correctly define the quadruplets of numbers for each linguistic variable, otherwise the ranks of sustainable criteria and product features may be change. For instance, modifying linguistic variables as illustrated in Figure 5.9, results in new ranking shown in Table 5.5. The top three criteria remain unchanged despite their different rankings but regarding the following rankings, "Electric and electronic parts" enters the top five and evicts "Material usage". The changing rankings demonstrates that such modifications and

improper evaluation of linguistic variables can impact strategic decisions to enhance product remanufacturability. This underlines the importance of how designers express their opinions and decisions within the QFD model.

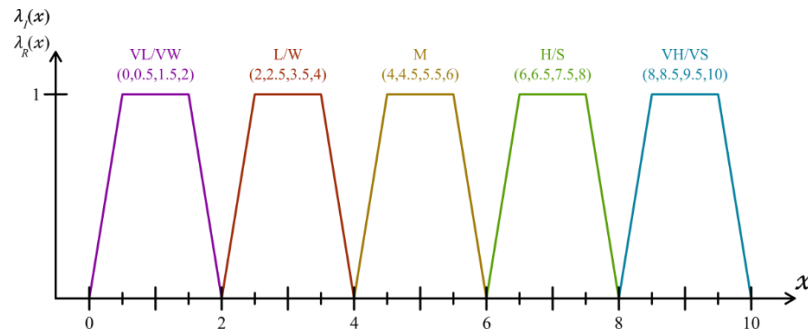


Figure 5.9 Modified fuzzy sets

Furthermore, trapezoidal fuzzy numbers capture uncertainties more effectively than triangular fuzzy numbers, especially when designers struggle to provide fixed crisp values. A flat top distribution allows more flexibility, improving the precision of the Fuzzy Sustainable QFD model as it reflects linguistic assessments from designers. Triangular fuzzy numbers are suitable for uncomplicated studies where designers have high confidence level. However, considering remanufacturing uncertainties and the aviation industry's rigorous requirements, trapezoidal fuzzy numbers are more appropriate due to their versatility in addressing remanufacturing complexities. By adopting the triangular fuzzy numbers principle into the model, Table 5.5 demonstrates the differences in ranking sustainable criteria and product features.

The objective in this paragraph is to validate the Fuzzy Sustainable QFD model. The robustness of sustainable criteria ranking will be assessed through various defuzzification methods selected from the literature. Firstly, the center of gravity (COG) method, described in the Section 5.3.3, is the most common defuzzification method that offers a balanced interpretation of fuzzy numbers. In contrast, Chen and Chen [142] proposed a simple center of gravity method (SCGM), an easier approach to calculate the center of gravity based on the medium curve concept. Cheng [143] proposed calculating the distance between the origin of the graph and the center of gravity (CI) in order to allow simultaneous ranking of two crisp values for a more precise fuzzy score ranking. Lin and Lee [144] presented a methodology based on the signed distance method (SDM). Given that fuzzy scores do not result in symmetric fuzzy linguistics, the SDM is more suitable than the COG methodology. Patra [145] introduced a novel method to defuzzify trapezoidal fuzzy numbers

based on mean position, area, and perimeter (MAP) and affirmed its effectiveness and precision by comparing it with other existing methods. Finally, considering asymmetric fuzzy scores, Gilda and Satarkar [146] suggested using the proportionate maxima method (PMM) instead of the mean of maxima for defuzzification. The proportionate maxima is calculated based on the trapezoidal fuzzy score's asymmetry level. This approach enhances precision and is more faithful to reality.

By applying each of these methodologies to the fuzzy scores obtained in the previous methodology, the different rankings of product features and sustainable criteria are summarized in Table 5.6 and illustrated in a graph in Figure 5.10. This analysis proves the validation of the Fuzzy Sustainable QFD model due to minimal variation in ranking and insensitivity to different defuzzification method. The results obtained are reliable and can be used for decision-making. Additionally, it is essential not only to focus on rank changes but also on the magnitude of differences between defuzzified values. By calculating each crisp value's proportion to the total crisp values, the standard deviation can be computed for each defuzzification method. Table 5.6 illustrates a low standard deviation that demonstrates the model's robustness.

Table 5.6 Ranks by different defuzzification methods

	COG	SCGM	CI	SDM	MAP	PMM
Size	15	15	15	15	16	15
Shape	14	14	14	14	15	13
Weight	17	17	17	17	17	17
Structure	9	9	9	9	8	11
Material	2	2	2	2	3	3
Number of components	12	12	12	12	10	8
Connection and fasteners	8	7	8	8	9	9
Operational time	1	1	1	1	1	2
Interchangeable parts	4	4	4	4	6	6
Electric and electronic parts	6	6	6	6	4	4
Energy resources used	10	10	10	10	12	10
Green House Gas	11	11	11	11	14	12
Material usage	5	5	5	5	5	5
Wastes	7	8	7	7	11	7
Operator's workload	3	3	3	3	2	1
Stress and fatigue	16	16	16	16	13	16
Injury risk	13	13	13	13	7	14
Standard deviation	0,016295182	0,016285785	0,016295098	0,016327496	0,032381746	0,016197771

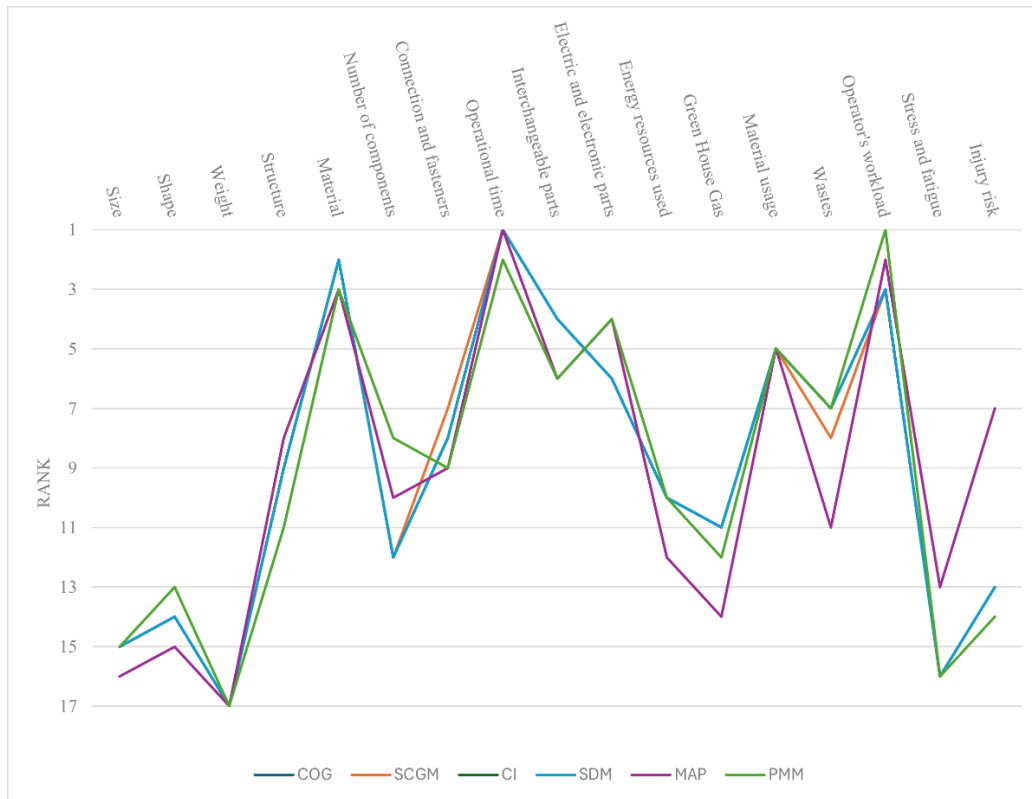


Figure 5.10 Ranks by different defuzzification methods

The implication of Fuzzy Sustainable QFD within the aeronautical industry enhances decision-making process during aircraft design by effectively handling uncertainties related to remanufacturing and subjectivities. This leads to a more informed and balanced decisions that aligns with both technical and sustainable criteria. The model manages to respond conflicting associated with the different levels of importance of requirements for different stakeholders. It enhances alignment between requirements and stakeholders' expectations, leading to a higher stakeholder engagement and accurate product design. The methodology systematically integrates environmental and social criteria, promoting design that are not only high-performing and optimized for remanufacturability but environmentally friendly and socially responsible. This approach supports greener aviation solutions and strengthens aviation industry's commitment to sustainable development. It also aligns with circular economy principle as it focuses on facilitating design for remanufacturing of aircraft components and yields cost savings throughout the multiple aircraft lifecycle, contributing to competitiveness and profitability. In summary, involving Fuzzy Sustainable QFD framework in the design phase supports sustainable, efficient, and competitive aviation industry remanufacturing practices.

5.6 Conclusion and future research

The escalating awareness of environmental issues necessitates a transition towards more sustainable aircraft production. Furthermore, the increasing number of aircraft reaching their end of their operational lifespan underlines the importance of remanufacturing to alleviate environmental impact and adhere to circular economy principles.

This paper examines remanufacturing within the aeronautical industry and revealed that it remains uncommon compared to other sectors, like automotive, or industrial machinery where such practices are becoming more widespread. The study proposes a mapping process in order to improve remanufacturing management in the aviation industry and a Design for remanufacturing guideline listing practices to enhance remanufacturability within a circular economy context.

Moreover, this paper explores the application of Fuzzy Sustainable QFD, which integrates circularity criteria and is tailored to improve remanufacturability by listing various requirements derived from DfRem guideline. Through the Fuzzy Sustainable QFD model, product features and sustainable criteria can be prioritized based on their ranking order. Additionally, by comparing two fuzzy logic techniques, the paper highlights the advantages of using trapezoidal fuzzy numbers to manage uncertainties inherent in remanufacturing and its great flexibility when dealing with complex aviation products.

Several defuzzification methods (COG, SGCM, CI, SDM, MAP, and PMM) from the literature were applied to emphasize the robustness of ranking order and demonstrate the reliability and validity of the model. However, while trapezoidal fuzzy numbers effectively translate designers' significant uncertainties, they become obsolete when designers show high confidence levels. Therefore, future research should focus on gathering sufficient data on failure origins of components, component's quality variation, and EOL aircraft quantities in order to adjust the quadruplet of numbers associated with linguistic variables, or potentially backing up to the use of triangular fuzzy numbers for scenarios with high confidence levels. Additionally, given the critical reliability and safety requirements of aircraft, uncertainties must be thoroughly analyzed and minimized. This underlines the importance of clearly defining the linguistic variables for accurate ranking.

In Section 5.4, the involvement of major authorities and their regulations was encompassed within the "Ease of testing and certification". However, it would be interesting to analyze these regulations

and understand their constraints and restrictions applied to each product features and sustainable criteria. Another line for future research would involve developing a new defuzzification method or incorporating major authorities' regulations into the Fuzzy Sustainable QFD approach to achieve the most prioritization of criteria and technical attributes.

In conclusion, adopting Fuzzy Sustainable QFD in the aeronautical industry offers several perspectives for enhancing sustainable remanufacturing practices. This paper contributes to fill gaps in QFD methodologies and remanufacturing within the aviation industry.

CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

6.1 Synthèse des travaux

La mobilité aérienne n'a jamais été aussi active de nos jours et l'industrie aéronautique connaît un essor considérable ces dernières années. Toutefois, la majorité des avions arrivant en fin de vie ne sont pas adaptés au processus de remanufacturing. Afin de s'accommoder à ce modèle circulaire, il est impératif de développer de nouvelles conceptions d'avions qui intègrent des critères favorisant le remanufacturing grâce à des outils de conception et d'aide à la décision tels que l'approche QFD. L'état de l'art réalisé dans le CHAPITRE 2 a démontré que le remanufacturing est un concept largement étudié dans l'industrie automobile et électronique, mais encore peu exploré dans l'industrie aéronautique. La revue de littérature a également mis en lumière l'utilisation croissante de l'approche QFD pour améliorer la remanufacturabilité des produits.

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette recherche est de développer un outil d'aide à la décision permettant de faire des choix de conception adaptés aux opérations de remanufacturing. Cet outil doit également prendre en compte les incertitudes inhérentes à ce processus et aux prises de décision. Pour répondre à ces enjeux, deux articles ont été élaborés. Avec l'intégration de la fonction triangulaire, le premier article propose initialement une approche Fuzzy Sustainable QFD visant à optimiser le désassemblage dans le cadre de l'économie circulaire. Le deuxième article approfondit l'étude en proposant un guide pour le remanufacturing dans l'industrie aéronautique grâce aux éléments tirés de la revue de littérature. Contrairement au modèle développé dans le premier article, le second modèle bénéficie d'une meilleure implication des parties prenantes dans la méthodologie Fuzzy Sustainable QFD. La fonction trapézoïdale est utilisée pour une gestion plus fructueuse des incertitudes. Un exemple d'application sur une aile d'un Airbus A350 a été mené pour illustrer la méthodologie et atteindre l'objectif fixé dans cette recherche. Enfin, une analyse de sensibilité a validé le modèle en comparant les rangs des différents critères à travers plusieurs méthodes de défuzzification.

Cette recherche contribue ainsi à l'avancement des pratiques du remanufacturing dans l'industrie aéronautique en proposant une approche alternative et adaptée aux spécificités de ce domaine et dans un contexte aux enjeux durables.

6.2 Implication de la recherche

Le parcours mené dans cette recherche présente plusieurs implications. D'abord, sur l'aspect pratique, la proposition d'un guide permet d'assister les concepteurs dans leurs choix de conception facilitant la remanufacturabilité des pièces aéronautiques. Ainsi, cela promouvrait une industrie aéronautique plus circulaire où les avions bénéficieraient d'une durée de vie prolongée et d'une capacité de survivre à plusieurs cycles de vie. La promotion du remanufacturing pourrait entraîner une réduction des impacts environnementaux, et l'amélioration de ses pratiques et la simplification de ses activités mises en place par les concepteurs, optimiseraient les conditions de travail. L'intégration du concept du remanufacturing dans l'industrie aéronautique pourrait également contribuer à la création d'emplois en raison des diverses activités spécifiques au remanufacturing et favoriserait le développement de nouvelles compétences, notamment pour les recherches futures. En somme, ce projet de recherche aspire à une industrie plus durable qui répond aux enjeux environnementaux et sociaux actuels.

Mais encore, sur l'aspect théorique, ce projet de recherche contribue au développement d'un outil d'aide à la décision pour évaluer la remanufacturabilité. L'intégration de la logique floue et de la fonction trapézoïdale dans l'approche Fuzzy Sustainable QFD permet une meilleure prise en compte des incertitudes et des jugements subjectifs dans la phase de conception, ce qui est particulièrement pertinent dans le contexte du remanufacturing encore peu introduit dans l'industrie aéronautique. Il est donc envisageable d'obtenir une conception optimisée, plus juste et en accord avec l'expertise des parties prenantes. Finalement, la méthodologie présentée, qui intègre les critères techniques, environnementaux et sociaux, pourrait servir de référence pour d'autres études et applications dans le domaine.

6.3 Limites

Bien que le projet de recherche apporte son lot de contributions, il présente certaines limites dans l'application pratique du modèle. Tout d'abord, la modification des variables linguistiques entraîne des variations dans le classement des critères, ce qui peut affecter la fiabilité des résultats. Il appartient aux concepteurs d'évaluer la justesse de ces variables linguistiques, nécessitant une compréhension fine de ces nuances. Ensuite, l'exemple d'application repose sur un jugement personnel et des suppositions. Les résultats peuvent donc être remis en cause par des experts du domaine. L'accès aux informations, aux documents et à une base de données issus de certaines

compagnies de l'industrie aéronautique est restreint et empêche donc la vérification des résultats. Par conséquent, la validation du modèle se limite à une approche qualitative, sans preuve quantitative de sa robustesse.

6.4 Recherches futures

Les limites observées dans la section précédente permettent d'entrevoir les perspectives d'amélioration du modèle. Une première recherche future viserait à développer une méthode itérative afin de définir convenablement les variables linguistiques en fonction de la confiance des concepteurs. Il s'agirait également de collaborer avec une entreprise spécialisée dans le remanufacturing issue de l'industrie aéronautique. Ainsi, les informations et les données réelles récupérées grâce à cette collaboration, permettraient une application concrète du modèle proposé dans ce projet. Les résultats obtenus seraient donc plus fidèles à la réalité. Il serait intéressant de pouvoir réaliser plusieurs études de cas pour une meilleure généralisation et application du modèle. Une approche hybride viendrait renforcer la robustesse du modèle, jusqu'à présent vérifiée par une approche qualitative. Une recherche approfondie sur l'impact du modèle Fuzzy Sustainable QFD sur le remanufacturing dans l'industrie aéronautique serait à envisager pour évaluer l'efficacité opérationnelle et les conséquences en termes de durabilité sur le plan environnemental, social et économique.

Outre les limites méthodologiques, il faudrait également s'interroger sur les moyens, les outils et la stratégie à adopter pour mettre en place les activités du remanufacturing avec notamment l'aide des décideurs politiques. En effet, ces derniers jouent un rôle crucial dans la mesure où ils développent et mettent en œuvre des normes et des réglementations, et peuvent offrir des compensations financières pour faciliter et inciter à la transition vers une économie circulaire. Les recommandations pourraient donc être faites aux décideurs politiques pour encourager l'adoption du remanufacturing dans l'industrie aéronautique. Les résultats de cette recherche pourraient convaincre les politiques publiques en matière de développement durable et d'économie circulaire, en soulignant l'importance de soutenir les initiatives favorisant la durabilité et la remanufacturabilité.

RÉFÉRENCES

- [1] United Nations, « Conférence des Nations Unies sur l'environnement, Stockholm 1972 | Nations Unies », United Nations. Consulté le: 17 avril 2024. [En ligne]. Disponible à: <https://www.un.org/fr/conferences/environment/stockholm1972>
- [2] United Nations, « Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development | Department of Economic and Social Affairs ». Consulté le: 17 avril 2024. [En ligne]. Disponible à: <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- [3] United Nations, « Objectif de Développement Durable - Industrie, innovation et infrastructures ». Consulté le: 17 avril 2024. [En ligne]. Disponible à: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/infrastructure/>
- [4] « Energy Statistics Data Browser – Data Tools », IEA. Consulté le: 18 avril 2024. [En ligne]. Disponible à: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser>
- [5] M. Charter et C. Gray, « Remanufacturing and product design », *International Journal of Product Development - Int J Prod Dev*, vol. 6, janv. 2008, doi: 10.1504/IJPD.2008.020406.
- [6] S. Khan, A. Haleem, et N. Fatma, « Effective adoption of remanufacturing practices: a step towards circular economy », *Jnl Remanufactur*, vol. 12, n° 2, p. 167-185, juill. 2022, doi: 10.1007/s13243-021-00109-y.
- [7] « Decarbonisation | Airbus ». Consulté le: 23 juin 2024. [En ligne]. Disponible à: <https://www.airbus.com/en/sustainability/respecting-the-planet/decarbonisation>
- [8] L. Cohen, *Quality Function Deployment: How to Make QFD Work for You*. Addison-Wesley, 1995.
- [9] L. A. Zadeh, « Fuzzy sets », *Information and Control*, vol. 8, n° 3, p. 338-353, juin 1965, doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.
- [10] M. Lieder et A. Rashid, « Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry », *Journal of Cleaner Production*, vol. 115, p. 36-51, mars 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.12.042.
- [11] H. Corvellec, A. F. Stowell, et N. Johansson, « Critiques of the circular economy », *Journal of Industrial Ecology*, vol. 26, n° 2, p. 421-432, 2022, doi: 10.1111/jiec.13187.
- [12] F. Acerbi et M. Taisch, « A literature review on circular economy adoption in the manufacturing sector », *Journal of Cleaner Production*, vol. 273, p. 123086, nov. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123086.
- [13] D. R. Cooper et J. M. Allwood, « Reusing Steel and Aluminum Components at End of Product Life », *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, n° 18, p. 10334-10340, sept. 2012, doi: 10.1021/es301093a.
- [14] T. E. Norgate, S. Jahanshahi, et W. J. Rankin, « Assessing the environmental impact of metal production processes », *Journal of Cleaner Production*, vol. 15, n° 8-9, p. 838-848, janv. 2007, doi: 10.1016/j.jclepro.2006.06.018.

- [15] L. Farrant, S. I. Olsen, et A. Wangel, « Environmental benefits from reusing clothes », *Int J Life Cycle Assess*, vol. 15, n° 7, p. 726-736, août 2010, doi: 10.1007/s11367-010-0197-y.
- [16] J. Flizikowski, W. Kruszelnicka, et M. Macko, « The Development of Efficient Contaminated Polymer Materials Shredding in Recycling Processes », *Polymers*, vol. 13, n° 5, Art. n° 5, janv. 2021, doi: 10.3390/polym13050713.
- [17] P. Jagadeesh *et al.*, « Sustainable recycling technologies for thermoplastic polymers and their composites: A review of the state of the art », *Polymer Composites*, vol. 43, n° 9, p. 5831-5862, 2022, doi: 10.1002/pc.27000.
- [18] J. S. Ribeiro et J. de O. Gomes, « A Framework to Integrate the End-of-Life Aircraft in Preliminary Design », *Procedia CIRP*, vol. 15, p. 508-513, janv. 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.06.077.
- [19] M. Kutz, Éd., « Environmentally Conscious Mechanical Design », dans *Environmentally Conscious Mechanical Design*, 1^{re} éd., Wiley, 2007. doi: 10.1002/9780470168202.fmatter.
- [20] R. Pamminger, S. Glaser, et W. Wimmer, « Modelling of different circular end-of-use scenarios for smartphones », *Int J Life Cycle Assess*, vol. 26, n° 3, p. 470-482, mars 2021, doi: 10.1007/s11367-021-01869-2.
- [21] J.-H. Zhang, B. Yang, et M. Chen, « Challenges of the development for automotive parts remanufacturing in China », *Journal of Cleaner Production*, vol. 140, p. 1087-1094, janv. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.061.
- [22] D. P. José *et al.*, « Remanufacturing in Developing Countries – A Case Study in Automotive Sector in Ecuador », *Procedia CIRP*, vol. 116, p. 534-539, 2023, doi: 10.1016/j.procir.2023.02.090.
- [23] K. L. Karunarathna et J. R. Gamage, « Framework to Promote Automotive Remanufacturing: Case Study of Automotive Repairing, Rebuilding, and Remanufacturing Industry in Sri Lanka », dans *2022 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, juill. 2022, p. 1-6. doi: 10.1109/MERCon55799.2022.9906246.
- [24] M. Matsumoto et Y. Umeda, « An analysis of remanufacturing practices in Japan », *Jnl Remanufactur*, vol. 1, n° 1, p. 2, juill. 2011, doi: 10.1186/2210-4690-1-2.
- [25] F. Wang, J. Huisman, A. Stevels, et C. P. Baldé, « Enhancing e-waste estimates: Improving data quality by multivariate Input–Output Analysis », *Waste Management*, vol. 33, n° 11, p. 2397-2407, nov. 2013, doi: 10.1016/j.wasman.2013.07.005.
- [26] F. O. Ongondo, I. D. Williams, et T. J. Cherrett, « How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes », *Waste Management*, vol. 31, n° 4, p. 714-730, avr. 2011, doi: 10.1016/j.wasman.2010.10.023.
- [27] G. I. Zlamparet, W. Ijomah, Y. Miao, A. K. Awasthi, X. Zeng, et J. Li, « Remanufacturing strategies: A solution for WEEE problem », *Journal of Cleaner Production*, vol. 149, p. 126-136, avr. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.02.004.
- [28] « Waste from Electrical and Electronic Equipment (WEEE) - European Commission ». Consulté le: 6 février 2024. [En ligne]. Disponible à: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-electrical-and-electronic-equipment-weee_en

- [29] K. Habib, E. Mohammadi, et S. Vihanga Withanage, « A first comprehensive estimate of electronic waste in Canada », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 448, p. 130865, avr. 2023, doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.130865.
- [30] S. Shahbazi, K. Johansen, et E. Sundin, « Product Design for Automated Remanufacturing—A Case Study of Electric and Electronic Equipment in Sweden », *Sustainability*, vol. 13, n° 16, Art. n° 16, janv. 2021, doi: 10.3390/su13169039.
- [31] O. Osibanjo et I. C. Nnorom, « Material flows of mobile phones and accessories in Nigeria: Environmental implications and sound end-of-life management options », *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 28, n° 2, p. 198-213, févr. 2008, doi: 10.1016/j.eiar.2007.06.002.
- [32] D. Wahjudi, S. S. Gan, Y. Tanoto, J. Winata, et B. Tjahjono, « Drivers and Barriers of Mobile Phone Remanufacturing Business in Indonesia: Perspectives of Retailers », *E3S Web of Conferences*, vol. 130, p. 01006, janv. 2019, doi: 10.1051/e3sconf/201913001006.
- [33] I. D'Adamo et P. Rosa, « Remanufacturing in industry: advices from the field », *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 86, n° 9, p. 2575-2584, oct. 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8346-5.
- [34] A. Mann, P. Saxena, M. Almani, O. Okorie, et K. Salonitis, « Environmental Impact Assessment of Different Strategies for the Remanufacturing of User Electronics », *Energies*, vol. 15, n° 7, Art. n° 7, janv. 2022, doi: 10.3390/en15072376.
- [35] J. S. C. Low et Y. T. Ng, « Improving the Economic Performance of Remanufacturing Systems through Flexible Design Strategies: A Case Study Based on Remanufacturing Laptop Computers for the Cambodian Market », *Bus Strat Env*, vol. 27, n° 4, p. 503-527, mai 2018, doi: 10.1002/bse.2017.
- [36] International Civil Aviation Organization, « Air transport, passengers carried », World Bank Open Data. Consulté le: 5 avril 2024. [En ligne]. Disponible à: <https://data.worldbank.org>
- [37] C. Bergero, G. Gosnell, D. Gielen, S. Kang, M. Bazilian, et S. J. Davis, « Pathways to net-zero emissions from aviation », *Nat Sustain*, vol. 6, n° 4, p. 404-414, avr. 2023, doi: 10.1038/s41893-022-01046-9.
- [38] R. Curran et D. van Heerden, « Value extraction from end-of-life aircraft », dans *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, R. Blockley et W. Shyy, Éd., Chichester: Wiley, 2011, p. 3715-3726.
- [39] I. Towle, C. Johnston, R. Lingwood, et P. S. Grant, « The Aircraft at End of Life Sector: a Preliminary Study », [Dissertation], Oxford University Parks Road, 2004.
- [40] E. Sundin et B. Bras, « Making functional sales environmentally and economically beneficial through product remanufacturing », *Journal of Cleaner Production*, vol. 13, n° 9, p. 913-925, juill. 2005, doi: 10.1016/j.jclepro.2004.04.006.
- [41] J. S. Ribeiro et J. D. O. Gomes, « Proposed Framework for End-of-life Aircraft Recycling », *Procedia CIRP*, vol. 26, p. 311-316, 2015, doi: 10.1016/j.procir.2014.07.048.
- [42] E. Asmatulu, M. Overcash, et J. Twomey, « Recycling of Aircraft: State of the Art in 2011 », *Journal of Industrial Engineering*, vol. 2013, p. 1-8, janv. 2013, doi: 10.1155/2013/960581.

- [43] X. Zhao, W. J. C. Verhagen, et R. Curran, « Disposal and Recycle Economic Assessment for Aircraft and Engine End of Life Solution Evaluation », *Applied Sciences*, vol. 10, n° 2, Art. n° 2, janv. 2020, doi: 10.3390/app10020522.
- [44] V. Hashemi, M. Chen, et L. Fang, « Process planning for closed-loop aerospace manufacturing supply chain and environmental impact reduction », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 75, p. 87-95, sept. 2014, doi: 10.1016/j.cie.2014.06.005.
- [45] Z. Chen, H. Zhou, Z. Zhu, C. Xu, et Y. Zhou, « Laser cladding remanufacturing of aircraft landing gear based on 30CrMnSiNi2A steel », *Optik*, vol. 283, p. 170902, juill. 2023, doi: 10.1016/j.ijleo.2023.170902.
- [46] A. Shrivastava, A. K. S., S. Rao, N. B.K., S. Barad, et S. T.N., « Remanufacturing of nickel-based aero-engine components using metal additive manufacturing technology », *Materials Today: Proceedings*, vol. 45, p. 4893-4897, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.355.
- [47] Rahito, D. A. Wahab, et A. H. Azman, « Additive Manufacturing for Repair and Restoration in Remanufacturing: An Overview from Object Design and Systems Perspectives », *Processes*, vol. 7, n° 11, Art. n° 11, nov. 2019, doi: 10.3390/pr7110802.
- [48] J. Liang, D. Wu, S. Liu, H. Wang, et J. Yu, « Research on hybrid remanufacturing process chain of laser cladding, CNC machining and ultrasonic rolling for aero-engine blades », *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 110, p. 331-349, janv. 2024, doi: 10.1016/j.jmapro.2023.12.059.
- [49] Y. Jin, A. Muriel, et Y. Lu, « On the Profitability of Remanufactured Products », janv. 2007, [En ligne]. Disponible à: https://www.researchgate.net/publication/228977678_On_the_Profitability_of_Remanufactured_Products
- [50] E. Sundin, « Map of Remanufacturing Business Model Landscape ». European Commission, 2016. [En ligne]. Disponible à: <https://www.remanufacturing.eu/assets/pdfs/ERN-D-3-1-Map-of-Remanufacturing-Business-Model-Landscape.pdf>
- [51] « Sky-high potential for aircraft recycling ». Recycling International, 2012. [En ligne]. Disponible à: https://recyclinginternational.com/wp-content/uploads/2018/05/RI_2-2012.pdf
- [52] J. Kurilova-Palisaitiene, E. Sundin, et B. Poksinska, « Remanufacturing challenges and possible lean improvements », *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, p. 3225-3236, janv. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.023.
- [53] J. Gao, X. Chen, O. Yilmaz, et N. Gindy, « An integrated adaptive repair solution for complex aerospace components through geometry reconstruction », *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 36, n° 11-12, p. 1170-1179, avr. 2008, doi: 10.1007/s00170-006-0923-6.
- [54] B. Bras et M. W. McIntosh, « Product, process, and organizational design for remanufacture – an overview of research », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 15, n° 3, p. 167-178, juin 1999, doi: 10.1016/S0736-5845(99)00021-6.
- [55] H. C. Fang, S. K. Ong, et A. Y. C. Nee, « An Integrated Approach for Product Remanufacturing Assessment and Planning », *Procedia CIRP*, vol. 40, p. 262-267, janv. 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.01.118.

- [56] G. D. Hatcher, W. L. Ijomah, et J. F. C. Windmill, « Integrating design for remanufacture into the design process: the operational factors », *Journal of Cleaner Production*, vol. 39, p. 200-208, janv. 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.08.015.
- [57] L. Dunand, « End-of-life Reusing, recycling, rethinking | Airbus Aircraft ». Consulté le: 5 avril 2024. [En ligne]. Disponible à: <https://aircraft.airbus.com/en/newsroom/news/2022-11-end-of-life-reusing-recycling-rethinking>
- [58] S. L. Soh, S. K. Ong, et A. Y. C. Nee, « Design for Disassembly for Remanufacturing: Methodology and Technology », *Procedia CIRP*, vol. 15, p. 407-412, janv. 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.06.053.
- [59] L. H. Shu et W. C. Flowers, « Application of a design-for-remanufacture framework to the selection of product life-cycle fastening and joining methods », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 15, n° 3, p. 179-190, juin 1999, doi: 10.1016/S0736-5845(98)00032-5.
- [60] F. Cruz Rios, W. Chong, et D. Grau, « Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities », *Procedia Engineering*, vol. 118, p. 1296-1304, déc. 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.485.
- [61] S. Behrendt, C. Jasch, M. Constança Peneda, et H. Weenen, *Life Cycle Design: A Manual for Small and Medium-Sized Enterprises*. 1997. Consulté le: 9 avril 2024. [En ligne]. Disponible à: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-60783-7>
- [62] R. Hammond, T. Amezquita, B. Bras, et G. Woodruff, « Issues in the Automotive Parts Remanufacturing Industry - A Discussion of Results from Surveys Performed among Remanufacturers », 1998. Consulté le: 30 avril 2024. [En ligne]. Disponible à: <https://www.semanticscholar.org/paper/Issues-in-the-Automotive-Parts-Remanufacturing-A-of-Hammond-Amezquita/eb848085b4858051e8ff60b37e2c343aeb7419b0>
- [63] T. Tolio *et al.*, « Design, management and control of demanufacturing and remanufacturing systems », *CIRP Annals*, vol. 66, n° 2, p. 585-609, 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.05.001.
- [64] W. Liu, B. Zhang, M. Z. Li, Y. Li, et H.-C. Zhang, « Study on Remanufacturing Cleaning Technology in Mechanical Equipment Remanufacturing Process », dans *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*, A. Y. C. Nee, B. Song, et S.-K. Ong, Éd., Singapore: Springer Singapore, 2013, p. 643-648. doi: 10.1007/978-981-4451-48-2_105.
- [65] X. Zhang, S. Zhang, L. Zhang, J. Xue, R. Sa, et H. Liu, « Identification of product's design characteristics for remanufacturing using failure modes feedback and quality function deployment », *Journal of Cleaner Production*, vol. 239, p. 117967, déc. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117967.
- [66] M. Hundal, « Systematic mechanical designing : a cost and management perspective », 1997. Consulté le: 6 avril 2024. [En ligne]. Disponible à: <https://www.semanticscholar.org/paper/Systematic-mechanical-designing-%3A-a-cost-and-Hundal/ad13fdbeebad2884893e7e37a8aea230b99ca151>
- [67] T. Amezquita, R. Hammond, M. Salazar, et B. Bras, « Characterizing the remanufacturability of engineering systems », dans *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, American Society of Mechanical Engineers, 1995, p. 271-278.

- [68] M. Errington et S. J. Childe, « A business process model of inspection in remanufacturing », *Jnl Remanufactur*, vol. 3, n° 1, p. 7, juill. 2013, doi: 10.1186/2210-4690-3-7.
- [69] F. R. Miglorância, « Life Monitoring Program: A Proposal For Product End Of Life Management », dans *Challenges and Maturity of Production Engineering: competitiveness of enterprises, working conditions, environment*, 2010. [En ligne]. Disponible à: https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_TI_ST_113_740_17486.pdf
- [70] A. Elsayed, T. Roetger, et A. Bann, « Best Practices and Standards in Aircraft End-of-Life and Recycling », 2018.
- [71] « Best Industry Practices for Aircraft Decommissioning », vol. Best Industry Practices for Aircraft Decommissioning (BIPAD) 1st Edition, 2018.
- [72] J. Östlin, E. Sundin, et M. Björkman, « Product life-cycle implications for remanufacturing strategies », *Journal of Cleaner Production*, vol. 17, n° 11, p. 999-1009, juill. 2009, doi: 10.1016/j.jclepro.2009.02.021.
- [73] Y. A. Alamerew et D. Brissaud, « Circular economy assessment tool for end of life product recovery strategies », *Jnl Remanufactur*, vol. 9, n° 3, p. 169-185, oct. 2019, doi: 10.1007/s13243-018-0064-8.
- [74] W. Kerr et C. Ryan, « Eco-efficiency gains from remanufacturing: A case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia », *Journal of Cleaner Production*, vol. 9, n° 1, p. 75-81, févr. 2001, doi: 10.1016/S0959-6526(00)00032-9.
- [75] E. Sundin, « Product and process design for successful remanufacturing », [Dissertation], Linköping University Electronic Press, 2004.
- [76] M. A. Seitz et K. Peattie, « Meeting the Closed-Loop Challenge: The Case of Remanufacturing », *California Management Review*, vol. 46, n° 2, p. 74-89, janv. 2004, doi: 10.2307/41166211.
- [77] P. Lundmark, E. Sundin, et M. Björkman, « Industrial challenges within the remanufacturing system », *Proceedings of Swedish Production Symposium*, janv. 2009.
- [78] M. Chen et P. Abrishami, « A mathematical model for production planning in hybrid manufacturing-remanufacturing systems », *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 71, n° 5, p. 1187-1196, mars 2014, doi: 10.1007/s00170-013-5538-0.
- [79] H.-S. Lee et K. No, « Materials and Manufacturing Technology for Aerospace Application », *Key Engineering Materials*, vol. 707, p. 148-153, sept. 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.707.148.
- [80] R. E. Lyon, « Materials with reduced flammability in aerospace and aviation », *Advances in Fire Retardant Materials*, p. 573-598, janv. 2008, doi: <https://doi.org/10.1533/9781845694701.3.573>.
- [81] L. Lindkvist Haziri, E. Sundin, et T. Sakao, « Feedback from Remanufacturing: Its Unexploited Potential to Improve Future Product Design », *Sustainability*, vol. 11, n° 15, Art. n° 15, janv. 2019, doi: 10.3390/su11154037.
- [82] J. Vogt Duberg, G. Johansson, E. Sundin, et J. Kurilova-Palisaitiene, « Prerequisite factors for original equipment manufacturer remanufacturing », *Journal of Cleaner Production*, vol. 270, p. 122309, oct. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122309.

- [83] K. L. Soh et W. P. Wong, « Circular economy transition: Exploiting innovative eco-design capabilities and customer involvement », *Journal of Cleaner Production*, vol. 320, p. 128858, oct. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128858.
- [84] I. Szendiuch et K. Schischke, « Eco-Design - new part of technological integration », dans *2006 29th International Spring Seminar on Electronics Technology*, mai 2006, p. 521-526. doi: 10.1109/ISSE.2006.365161.
- [85] M. Royo, V. Chulvi, E. Mulet, et L. Ruiz-Pastor, « Analysis of parameters about useful life extension in 70 tools and methods related to eco-design and circular economy », *Journal of Industrial Ecology*, vol. 27, n° 2, p. 562-586, 2023, doi: 10.1111/jiec.13378.
- [86] S. B. Han, S. K. Chen, M. Ebrahimpour, et M. S. Sodhi, « A conceptual QFD planning model », *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 18, n° 8, p. 796-812, janv. 2001, doi: 10.1108/02656710110401187.
- [87] D. Delgado-Hernandez, K. Bampton, et E. Aspinwall, « Quality function deployment in construction », *Construction Management & Economics*, vol. 25, p. 597-609, juin 2007, doi: 10.1080/01446190601139917.
- [88] Y. Zhang, « Green QFD-II: A life cycle approach for environmentally conscious manufacturing by integrating LCA and LCC into QFD matrices », *International Journal of Production Research*, vol. 37, n° 5, p. 1075-1091, mars 1999, doi: 10.1080/002075499191418.
- [89] D. Siwiec, A. Pacana, et A. Gazda, « A New QFD-CE Method for Considering the Concept of Sustainable Development and Circular Economy », *Energies*, vol. 16, n° 5, 2023, doi: 10.3390/en16052474.
- [90] M. Bevilacqua, F. E. Ciarapica, et G. Giacchetta, « A fuzzy-QFD approach to supplier selection », *Journal of Purchasing and Supply Management*, vol. 12, n° 1, p. 14-27, janv. 2006, doi: 10.1016/j.pursup.2006.02.001.
- [91] M.-C. Lin, C.-Y. Tsai, C.-C. Cheng, et C. A. Chang, « Using Fuzzy QFD for Design of Low-end Digital Camera », *Int. J. Appl. Sci. Eng.*, vol. 2, n° 3, p. 222-233, 2004, doi: 10.6703/IJASE.2004.2(3).222.
- [92] T. T. Sousa-Zomer et P. A. C. Miguel, « A QFD-based approach to support sustainable product-service systems conceptual design », *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 88, n° 1, p. 701-717, janv. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-8809-8.
- [93] T.-C. Kuo et W. Hsin-Hung, « Fuzzy Eco-Design Product Development by Using Quality Function Deployment », dans *2005 4th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, déc. 2005, p. 422-429. doi: 10.1109/ECODIM.2005.1619260.
- [94] G. H. Lee et S. H. Park, « Fuzzy QFD-Based Prioritization of Work Activities of Construction for Safety », *ICIC Express Letters, Part B: Applications*, vol. 12, n° 1, p. 1-8, juill. 2020, doi: 10.24507/icicelb.12.01.1.
- [95] S. Rawariya, « Application of Quality Function Deployment in Remanufacturing: A Case of Remanufactured Passenger Car », dans *All India Seminar on Design & Analysis of mechanical system using Optimization Techniques*, oct. 2011.

- [96] C. Chen, Q. Gong, M. Hu, Z. Jiang, Y. Xiong, et Z. Cao, « Green Design of A Descaling Machine for Remanufacturing Cleaning Based on QFDE », dans *2022 International Conference on Cyber-Physical Social Intelligence (ICCSI)*, nov. 2022, p. 578-582. doi: 10.1109/ICCSI55536.2022.9970608.
- [97] R. Armacost, D. Balakrishnan, et J. Pet-Armacost, « Design for Remanufacturability Using QFD », *Proceedings of the 11th Annual Industrial Engineering Research Conference: IERC-2002*, mai 2002.
- [98] H. Yüksel, « Design of automobile engines for remanufacture with quality function deployment », *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 3, n° 3, p. 170-180, sept. 2010, doi: 10.1080/19397038.2010.486046.
- [99] S. Yang, S. K. Ong, et A. Y. C. Nee, « Design for Remanufacturing - A Fuzzy-QFD Approach », dans *Re-engineering Manufacturing for Sustainability*, A. Y. C. Nee, B. Song, et S.-K. Ong, Éd., Singapore: Springer, 2013, p. 655-661. doi: 10.1007/978-981-4451-48-2_107.
- [100] J. Shi, M. Ren, F. Shu, H. Xu, et J. Cui, « A remanufacturing process optimization method based on integrated fuzzy QFD and FMEA », *Jnl Remanufactur*, vol. 13, n° 2, p. 121-136, juill. 2023, doi: 10.1007/s13243-022-00123-8.
- [101] Z. Jiang, Z. Fan, J. W. Sutherland, H. Zhang, et X. Zhang, « Development of an optimal method for remanufacturing process plan selection », *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 72, n° 9, p. 1551-1558, juin 2014, doi: 10.1007/s00170-014-5783-x.
- [102] N. Guichon, « Recherche-développement et didactique des langues », *Recherches en didactique des langues et des cultures*, vol. 4, juin 2007, doi: 10.4000/rdlc.4903.
- [103] S. L. Soh, S. K. Ong, et A. Y. C. Nee, « Application of Design for Disassembly from Remanufacturing Perspective », *Procedia CIRP*, vol. 26, p. 577-582, janv. 2015, doi: 10.1016/j.procir.2014.07.028.
- [104] M. den Hollander, C. A. Bakker, et E. Hultink, « Product Design in a Circular Economy: Development of a Typology of Key Concepts and Terms: Key Concepts and Terms for Circular Product Design », *Journal of Industrial Ecology*, vol. 21, mai 2017, doi: 10.1111/jiec.12610.
- [105] D. Hunkeler et G. Rebitzer, « The Future of Life Cycle Assessment », *Int J Life Cycle Assessment*, vol. 10, n° 5, p. 305-308, sept. 2005, doi: 10.1065/lca2005.09.001.
- [106] G. Matthieu, P. François, et A. Tchangani, « Optimising end-of-life system dismantling strategy », *International Journal of Production Research*, vol. 50, n° 14, p. 3738-3754, juill. 2012, doi: 10.1080/00207543.2011.588263.
- [107] R. Bogue, « Design for disassembly: a critical twenty-first century discipline », *Assembly Automation*, vol. 27, n° 4, p. 285-289, janv. 2007, doi: 10.1108/01445150710827069.
- [108] P. Crowther, « Design for Disassembly - Themes and Principles », janv. 2005.
- [109] I. Bourgeois, A. Queirós, J. Oliveira, H. Rodrigues, R. Vicente, et V. M. Ferreira, « Development of an Eco-Design Tool for a Circular Approach to Building Renovation Projects », *Sustainability*, vol. 14, n° 14, Art. n° 14, janv. 2022, doi: 10.3390/su14148969.

- [110] A. Romli, P. Prickett, R. Setchi, et S. Soe, « Integrated eco-design decision-making for sustainable product development », *International Journal of Production Research*, vol. 53, n° 2, p. 549-571, janv. 2015, doi: 10.1080/00207543.2014.958593.
- [111] J. Zhou, L. Zhai, et A. A. Pantelous, « Market segmentation using high-dimensional sparse consumers data », *Expert Systems with Applications*, vol. 145, p. 113136, mai 2020, doi: 10.1016/j.eswa.2019.113136.
- [112] S. Keivanpour, « A Fuzzy Sustainable Quality Function Deployment Approach to Design for Disassembly with Industry 4.0 Technologies Enablers », dans *Manufacturing Driving Circular Economy*, H. Kohl, G. Seliger, et F. Dietrich, Éd., dans *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2023, p. 772-780. doi: 10.1007/978-3-031-28839-5_86.
- [113] X. Zhang, H. Zhang, Z. Jiang, et Y. Wang, « An integrated model for remanufacturing process route decision », *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 28, n° 5, p. 451-459, mai 2015, doi: 10.1080/0951192X.2014.880804.
- [114] M. Suliga, R. Wartacz, J. Kostrzewa, et M. Hawryluk, « Assessment of the Possibility of Reducing Energy Consumption and Environmental Pollution in the Steel Wire Manufacturing Process », *Materials*, vol. 16, n° 5, p. 1940, févr. 2023, doi: 10.3390/ma16051940.
- [115] A. F. H. Librantz, F. C. R. Dos Santos, C. G. Dias, A. C. A. Da Cunha, I. Costa, et M. De Mesquita Spinola, « AHP Modelling and Sensitivity Analysis for Evaluating the Criticality of Software Programs », dans *Advances in Production Management Systems. Initiatives for a Sustainable World*, vol. 488, I. Nääs, O. Vendrametto, J. Mendes Reis, R. F. Gonçalves, M. T. Silva, G. Von Cieminski, et D. Kiritsis, Éd., dans *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, vol. 488. , Cham: Springer International Publishing, 2016, p. 248-255. doi: 10.1007/978-3-319-51133-7_30.
- [116] S. Prendeville et N. Bocken, « Design for Remanufacturing and Circular Business Models », déc. 2015. doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-0471-1_18.
- [117] X. Zheng et P. Pulli, « Improving Mobile Services Design: A QFD Approach. », *Computing and Informatics*, vol. 26, p. 369-381, janv. 2007.
- [118] A. Tidwell et J. S. Sutterfield, « Supplier selection using QFD: a consumer products case study », *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 29, n° 3, p. 284-294, mars 2012, doi: 10.1108/02656711211216144.
- [119] C.-C. Chen, « Application of quality function deployment in the semiconductor industry: A case study », *Computers & Industrial Engineering*, vol. 58, n° 4, p. 672-679, mai 2010, doi: 10.1016/j.cie.2010.01.011.
- [120] R. Lund, « Remanufacturing: an American resource », dans *Proceedings of the fifth international congress environmentally conscious design and manufacturing*, June, 1998.
- [121] D. R. Cooper et T. G. Gutowski, « The Environmental Impacts of Reuse: A Review », *Journal of Industrial Ecology*, vol. 21, n° 1, p. 38-56, 2017, doi: 10.1111/jiec.12388.
- [122] R. Subramoniam, D. Huisinigh, R. B. Chinnam, et S. Subramoniam, « Remanufacturing Decision-Making Framework (RDMF): research validation using the analytical hierarchical

- process », *Journal of Cleaner Production*, vol. 40, p. 212-220, févr. 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2011.09.004.
- [123] G. D. Hatcher, W. L. Ijomah, et J. F. C. Windmill, « A network model to assist 'design for remanufacture' integration into the design process », *Journal of Cleaner Production*, vol. 64, p. 244-253, févr. 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.09.021.
- [124] K. Chakraborty, S. Mondal, et K. Mukherjee, « Analysis of product design characteristics for remanufacturing using Fuzzy AHP and Axiomatic Design », *Journal of Engineering Design*, vol. 28, n° 5, p. 338-368, mai 2017, doi: 10.1080/09544828.2017.1316014.
- [125] S. S. Yang, S. K. Ong, et A. Y. C. Nee, « A Decision Support Tool for Product Design for Remanufacturing », *Procedia CIRP*, vol. 40, p. 144-149, janv. 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.01.085.
- [126] S. S. Yang, N. Nasr, S. K. Ong, et A. Y. C. Nee, « Designing automotive products for remanufacturing from material selection perspective », *Journal of Cleaner Production*, vol. 153, p. 570-579, juin 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.08.121.
- [127] N. Tchertchian, D. Millet, et O. Pialot, « Modifying module boundaries to design remanufacturable products: the modular grouping explorer tool », *Journal of Engineering Design*, vol. 24, n° 8, p. 546-574, août 2013, doi: 10.1080/09544828.2013.776671.
- [128] M. Sherwood, L. H. Shu, et R. G. Fenton, « Supporting Design for Remanufacture through Waste-Stream Analysis of Automotive Remanufacturers », *CIRP Annals*, vol. 49, n° 1, p. 87-90, janv. 2000, doi: 10.1016/S0007-8506(07)62902-3.
- [129] H. Warnecke et R. Steinhilper, « Designing products with built-in reconditioning features », dans *Proceedings of the 6th Annual Conference on Design Engineering*, 1983, p. 241-248.
- [130] S. Dowlatshahi, « A strategic framework for the design and implementation of remanufacturing operations in reverse logistics », *International Journal of Production Research*, vol. 43, n° 16, p. 3455-3480, août 2005, doi: 10.1080/00207540500118118.
- [131] I. Karvonen, K. Jansson, K. Behm, S. Vatanen, et D. Parker, « Identifying recommendations to promote remanufacturing in Europe », *Jnl Remanufactur*, vol. 7, n° 2, p. 159-179, déc. 2017, doi: 10.1007/s13243-017-0038-2.
- [132] M. Abramovici, M. Neubach, M. Fathi, et A. Holland, « Knowledge-Based Feedback of Product Use Information into Product Development », *DS 58-8: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 8, Design Information and Knowledge, Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08.2009*, p. 227-238, 2009.
- [133] D. Zhang, D. Hu, Y. Xu, et H. Zhang, « A framework for design knowledge management and reuse for Product-Service Systems in construction machinery industry », *Computers in Industry*, vol. 63, n° 4, p. 328-337, mai 2012, doi: 10.1016/j.compind.2012.02.008.
- [134] J. Wang, S. Yu, B. Qi, et J. Rao, « ECQFD & LCA based methodology for sustainable product design », dans *2010 IEEE 11th International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design 1*, nov. 2010, p. 1563-1567. doi: 10.1109/CAIDCD.2010.5681909.
- [135] K. Masui, T. Sakao, et A. Inaba, « Quality function deployment for environment: QFDE (1st report)-a methodology in early stage of DfE », dans *Proceedings Second International*

Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, déc. 2001, p. 852-857. doi: 10.1109/ECODIM.2001.992480.

- [136] C.-Y. Tsai, C.-C. Lo, et A. C. Chang, « Using Fuzzy QFD to enhance manufacturing strategic planning », *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, vol. 20, n° 1, p. 33-41, janv. 2003, doi: 10.1080/10170660309509222.
- [137] T.-C. Kuo, H.-H. Wu, et J.-I. Shieh, « Integration of environmental considerations in quality function deployment by using fuzzy logic », *Expert Systems with Applications*, vol. 36, n° 3, p. 7148-7156, avr. 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2008.08.029.
- [138] M. Sabaghi, Y. Cai, C. Mascle, et P. Baptiste, « Sustainability assessment of dismantling strategies for end-of-life aircraft recycling », *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 102, p. 163-169, sept. 2015, doi: 10.1016/j.resconrec.2015.08.005.
- [139] M. Spring et J. F. Dalrymple, « Product customisation and manufacturing strategy », *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 20, n° 4, p. 441-467, janv. 2000, doi: 10.1108/01443570010314782.
- [140] B. Piquet, « Flight Airworthiness Support Technology - Special edition A350X », juin 2013.
- [141] K. Gantois et A. J. Morris, « The multi-disciplinary design of a large-scale civil aircraft wing taking account of manufacturing costs », *Struct Multidisc Optim*, vol. 28, n° 1, p. 31-46, août 2004, doi: 10.1007/s00158-004-0427-7.
- [142] S.-J. Chen et S.-M. Chen, « Fuzzy risk analysis based on the ranking of generalized trapezoidal fuzzy numbers », *Appl Intell*, vol. 26, n° 1, p. 1-11, janv. 2007, doi: 10.1007/s10489-006-0003-5.
- [143] C.-H. Cheng, « A new approach for ranking fuzzy numbers by distance method », *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 95, n° 3, p. 307-317, mai 1998, doi: 10.1016/S0165-0114(96)00272-2.
- [144] L. Lin et H.-M. Lee, « Fuzzy assessment for sampling survey defuzzification by signed distance method », *Expert Systems with Applications*, vol. 37, n° 12, p. 7852-7857, déc. 2010, doi: 10.1016/j.eswa.2010.04.052.
- [145] K. Patra, « Fuzzy risk analysis using a new technique of ranking of generalized trapezoidal fuzzy numbers », *Granul. Comput.*, vol. 7, n° 1, p. 127-140, janv. 2022, doi: 10.1007/s41066-021-00255-5.
- [146] K. Gilda et S. Satarkar, « Defuzzification: Maxima methods with improved efficiency and their performance evaluation », dans *2022 IEEE Delhi Section Conference (DELCON)*, févr. 2022, p. 1-6. doi: 10.1109/DELCON54057.2022.9753474.