Royaume du Maroc
Université Mohammed V de Rabat
École Mohammadia d'Ingénieurs

PFE N° : 5/2026

FILIÈRE : Génie Mécanique

OPTION : Conception et Production Industrielle / Industrie Aéronautique

RAPPORT DE PROJET DE FIN D'ETUDES

Intitulé :

Mise en place du processus de fabrication des pièces cabine en impression 3D

Soutenu le 01/06/2026 par :
HAFID Hamza & YAZIDI Hamza

Au sein de :
Royal Air Maroc

Devant le Jury :

Président :	Mme I.TOUAIHER
Encadrant EMI :	M Y.MOUBACHIR
Rapporteur :	M O.NOUREDDINE
Encadrant Organisme d'accueil :	M.BOUTALEB
	M.OULMAATI

Année universitaire : 2025 – 2026

Dédicaces

Avec une sincère fidélité, une pure gratitude et un amour illimité que je dédie ce travail :

À mes chers parents,

À qui je dois ce travail,

Pour votre amour incontestable, votre compréhension et votre soutien constant tout au long de mes études. Que Dieu vous bénisse d'une bonne santé et d'une longue vie pleine de joie et de bonheur.

À mes deux soeurs,

Pour votre présence chaleureuse, vos conseils précieux, votre soutien indéfectible et vos encouragements permanents tout au long de mon parcours. Merci pour votre amour, votre patience et votre confiance, qui ont toujours été une source de motivation et de force dans les moments les plus difficiles.

À mes professeurs et enseignants,

Pour leurs connaissances transmises, leurs conseils précieux et leur contribution à ma formation.

À mes chers amis

C'est avec vous que je partage le meilleur de mes souvenirs. Mes moments de douleur devenaient supportables grâce à vous, et c'est par votre présence que mes moments de joie avaient un sens.

À mon cher binôme Hamza ;

Pour sa collaboration, son engagement et les efforts partagés durant la réalisation de ce projet..

HAFID Hamza

Dédicaces

À qui regarde le ciel et y voit non pas un plafond, mais un point de départ.

À mes parents,

À mon père, pour son soutien et sa présence tout au long de ce parcours. Et à toi, Maman, qui n'as jamais laissé une chute te définir, ni une épreuve te fermer une porte. Tu as su regarder chaque problème en face, en tirer la leçon qu'il fallait, et repartir plus lucide, plus forte, toujours debout. C'est cette résilience, celle qui apprend du passé et avance malgré tout, qui m'a silencieusement appris à ne jamais baisser les bras. Et dans les moments où moi-même je doutais, tu as été la première à croire en moi souvent avant même que j'y croie. C'est ce regard que tu as toujours posé sur moi qui m'a donné la force d'aller jusqu'au bout. Que Dieu vous garde tous les deux, vous accorde santé et sérénité, et vous permette de voir encore longtemps les fruits de votre amour.

À ma famille,

Et particulièrement à mes grands-parents, ma tante Amina, mes tantes maternelles, et à vous Monsieur Aissame. Pour votre soutien moral et physique, votre présence dans les moments où j'en avais le plus besoin, et cette chaleur familiale qui m'a toujours redonné de l'énergie. Vous avez été, chacun à votre façon, un pilier discret mais essentiel de cette réussite.

À tous ceux qui m'ont enseigné,

Pour leur encadrement, leurs conseils précieux et leur contribution tout au long de ce parcours.

À mon binôme Hamza,

Pour sa rigueur, son travail acharné et son engagement sans faille tout au long de ce projet. Ce travail n'aurait pas été le même sans toi.

À toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail,

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance.

À tous, ce n'est pas une fin, c'est la promesse d'un début...

YAZIDI Hamza

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Nous adressons nos sincères remerciements à toute l'équipe du Département Atelier de Révision de la Direction MRO pour son accueil, sa disponibilité et sa coopération. Nous exprimons plus particulièrement notre reconnaissance à Monsieur **Ali BOUTALEB**, Chef du Département Atelier de Révision, ainsi qu'à Monsieur **Mehdi OULMAATI**, Manager Cabin Maintenance, pour leur encadrement, leurs précieux conseils, leur accompagnement continu et la confiance qu'ils nous ont accordée tout au long de ce projet.

Nous tenons également à remercier chaleureusement notre encadrant académique, le Professeur **MOUBACHIR Younes**, I, pour son suivi rigoureux, sa disponibilité, ses orientations pertinentes et ses recommandations, qui ont largement contribué à la réussite de ce travail.

Nous adressons aussi nos plus sincères remerciements aux membres du jury, les Professeurs **TOUIHER Imane**, **NOUREDDINE Othmane**, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer et de juger ce travail.

Nous remercions l'ensemble du personnel de la ZIRAM pour son accueil chaleureux, son aide, sa convivialité ainsi que pour l'excellente ambiance de travail au sein de Royal Air Maroc.

Nos remerciements vont également à l'ensemble du corps professoral du Département Génie Mécanique de l'EMI pour la qualité de la formation dispensée et pour les connaissances acquises durant notre parcours académique.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à toutes les personnes ayant contribué directement ou indirectement à l'aboutissement de ce projet.

Résumé

Ce projet de fin d'études, réalisé au sein de la Direction MRO de Royal Air Maroc, s'inscrit dans une démarche d'innovation visant à évaluer et à intégrer les technologies de fabrication additive dans les activités de maintenance aéronautique. Face aux contraintes liées aux délais d'approvisionnement, à l'obsolescence de certaines pièces et à la nécessité d'améliorer la réactivité des opérations de maintenance, l'impression 3D apparaît comme une solution prometteuse pour la production locale de pièces non critiques.

L'objectif de ce projet est d'étudier la faisabilité technique, économique et réglementaire de l'implémentation de la fabrication additive au sein de Royal Air Maroc. Pour ce faire, plusieurs pièces représentatives des besoins de maintenance ont été sélectionnées et analysées. Une démarche de benchmark a été menée auprès de différents fournisseurs de solutions d'impression 3D afin de comparer les technologies, les matériaux, les performances de production ainsi que les coûts associés.

Les travaux réalisés ont permis d'identifier les technologies les plus adaptées aux exigences du secteur aéronautique, de comparer les solutions disponibles sur le marché et d'évaluer les gains potentiels en termes de coûts, de délais et de flexibilité. L'étude a également conduit à l'élaboration d'un modèle économique permettant d'estimer la rentabilité de l'investissement et de définir une stratégie d'intégration progressive de la fabrication additive au sein des activités MRO de Royal Air Maroc.

Mots-clés : fabrication additive, impression 3D, maintenance aéronautique, MRO, Royal Air Maroc, Boeing 787, pièces cabine, benchmark technologique, analyse technico-économique, matériaux polymères, qualification des matériaux, certification aéronautique, optimisation des coûts, réduction des délais d'approvisionnement, industrie 4.0.

Abstract

This final-year project, carried out within the MRO Department of Royal Air Maroc, is part of an innovation initiative aimed at evaluating and integrating additive manufacturing technologies into aircraft maintenance operations. In response to challenges related to supply chain delays, part obsolescence, and the need for greater maintenance responsiveness, 3D printing represents a promising solution for the local production of non-critical aircraft components.

The objective of this project is to assess the technical, economic, and regulatory feasibility of implementing additive manufacturing within Royal Air Maroc. To achieve this goal, several representative maintenance parts were selected and analyzed. A benchmarking study was conducted with various additive manufacturing solution providers in order to compare technologies, materials, production performance, and associated costs.

The work carried out enabled the identification of the most suitable technologies for aeronautical applications, the evaluation of available market solutions, and the assessment of potential benefits in terms of cost reduction, lead-time improvement, and operational flexibility. The study also led to the development of an economic model to estimate the profitability of the investment and to define a roadmap for the gradual integration of additive manufacturing into Royal Air Maroc's MRO activities.

Keywords : additive manufacturing, 3D printing, aircraft maintenance, MRO, Royal Air Maroc, Boeing 787, cabin components, technology benchmarking, techno-economic analysis, polymer materials, material qualification, aeronautical certification, cost optimization, lead time reduction, Industry 4.0.

الملخص

يُنجز هذا مشروع نهاية الدراسة داخل مديرية الصيانة والإصلاح التابعة لـ *Royal Air Maroc*، ويهدف إلى دراسة إمكانية إدماج تقنيات التصنيع الإضافي (Additive Manufacturing) أو الطباعة ثلاثية الأبعاد ضمن أنشطة الصيانة الجوية.

في ظل التحديات المرتبطة بآجال التوريد الطويلة، وتقادم بعض القطع، والحاجة إلى تحسين سرعة الاستجابة لعمليات الصيانة، تبرز الطباعة ثلاثية الأبعاد كحل مبتكر يسمح بإنتاج بعض القطع غير الحرجة محلياً وبكفاءة أكبر.

يهدف هذا المشروع إلى تقييم الجدوى التقنية والاقتصادية والتنظيمية لتطبيق تقنيات التصنيع الإضافي داخل شركة الخطوط الملكية المغربية. ولهذا الغرض، تم اختيار مجموعة من القطع التمثيلية وتحليلها، كما تم إجراء دراسة مقارنة بين عدد من مزودي حلول الطباعة ثلاثية الأبعاد من أجل مقارنة التقنيات والمواد المستخدمة وأداء الإنتاج والتكاليف المرتبطة بها.

وقد مكنت هذه الدراسة من تحديد أكثر التقنيات ملاءمة للمتطلبات الجوية، وتقييم المنافع المحتملة من حيث تقليص التكاليف وآجال التوريد وتحسين مرونة عمليات الصيانة. كما تم تطوير نموذج اقتصادي لتقدير مردودية الاستثمار واقتراح خارطة طريق لإدماج الطباعة ثلاثية الأبعاد بشكل تدريجي ضمن أنشطة الصيانة والإصلاح الخاصة بـ *Royal Air Maroc*.

الكلمات المفتاحية : الصيان التصنيع الإضافي، الطباعة ثلاثية الأبعاد، صيانة الطائرات، الصيانة والإصلاح والعَمرة (MRO)، الخطوط الملكية المغربية، بوينغ 787، مكونات المقصورة، المقارنة المرجعية للتقنيات، التحليل التقني والاقتصادي، المواد البوليمرية، تأهيل المواد، الاعتماد والتصديق في المجال الجوي، تحسين التكاليف، تقليص آجال التوريد، الصناعة 4.0ة الجوية، بوينغ 787، الفحص الدوري

Table des matières

Dédicaces . . . . . **i**

Dédicaces . . . . . **ii**

Remerciements . . . . . **iii**

Résumé . . . . . **iv**

Abstract . . . . . **v**

الملخص . . . . . **vi**

Liste des figures . . . . . **xi**

Liste des tableaux . . . . . **xiv**

Liste des abréviations . . . . . **xvi**

Introduction générale **1**

I Présentation de Royal Air Maroc **2**

I.1 Introduction 2

I.2 Aperçu général de Royal Air Maroc 2

I.2.1 Les secteurs d'activité de la Royal Air Maroc 3

I.2.1.1 Pôles métiers de base : le transport aérien 3

I.2.1.2 Pôles métiers connexes et filiales industrielles 3

I.2.2 Dates clés de la RAM 4

I.3 Flotte de la RAM 6

I.3.1 Organigramme général de la RAM 7

I.3.1.1 Organisation de l'activité MRO au sein de la RAM 7

I.3.1.2 Organisation du département Maintenance Équipement (ME) 8

I.3.1.3 Focus sur l'Atelier Cabine 9
I.3.1.4 Certifications et agréments 10
I.4 Structure technique de Royal Air Maroc 10
I.4.1 Le système de classification ATA 11
I.4.2 Décomposition fonctionnelle de la cabine 12
I.5 PN et SN dans la gestion des équipements 13
I.5.1 Part Number (PN) 13
I.5.2 Serial Number (SN) 14
I.5.3 Intérêt du couple PN / SN dans AMOS 14

II Phase Définir et Mesurer :Problématique et objectifs 15
II.1 Introduction 15
II.2 Présentation du contexte opérationnel 15
II.2.1 Atelier Cabine (MRO) 15
II.2.2 Périmètre : les pièces cosmétiques et esthétiques 16
II.2.3 Analyse des flux d'approvisionnement actuels 17
II.2.4 Étude Gemba 18
II.3 Analyse de Pareto — Sélection des pièces critiques 20

III Phase Analyser :Choix de la machine et matériau 23
III.1 Introduction 23
III.2 Etat de l'art 23
III.2.1 FDM – Fused Deposition Modeling 24
III.2.2 SLS — Frittage Sélectif par Laser 26
III.3 Choix de la Technologie d'impression 3D-Analyse multicritère pondérée . . 27
III.4 Choix du matériaux 28
III.4.1 Température de Transition Vitreuse 28
III.4.2 Classification de Flammabilité UL-94 30
III.4.3 Démarche de Constitution de la Base de Données Matériaux 31
III.4.4 Définition du Problème Réel 32
III.4.5 Cadre Méthodologique : La Méthode d'Ashby 32
III.4.6 Dérivation de l'Indice Principal : Contrainte Thermique 32
III.4.7 Dérivation de l'Indice Secondaire 1 : Contrainte de Rigidité 33
III.4.8 Dérivation de l'Indice Secondaire 2 : Contrainte de Résistance . . . 34
III.4.9 Indice Global : Méthode ADN (Approche par Niveau de Décision) . 34
III.4.10 Analyse par Double Diagramme d'Ashby 35
III.4.11 Résultats obtenus et graphes d'Ashby générés avec Granta CES . . 35
III.5 Test de Flammabilité FAR 25.853 41
III.5.1 Dégradation Thermique et Pyrolyse de l'ULTEM™ 9085 42
III.5.2 Résultats Bibliographiques du Test de Flammabilité 45

III.6 Propriétés Mécaniques et Thermophysiques de l'ULTEM™ 9085 48
III.6.1 Comportement Mécanique en Traction 48
III.6.2 Comportement Thermophysique 50
III.7 Cas d'étude : défaillance récurrente des inserts d'accoudoirs 52
III.8 Simulation Statique de l'Insert d'Accoudoir 53
III.8.1 Cas de Charge Passager 53
III.8.1.1 Géométrie, Maillage et Conditions aux Limites 53
III.8.1.2 Équations Gouvernantes 55
III.8.1.3 Résultats et Analyse 57
III.8.2 Cas de Charge Technicien 59
III.8.2.1 Conditions aux Limites 59
III.8.2.2 Résultats et Analyse 59
III.9 Optimisation de la Géométrie de l'Insert d'Accoudoir 61
III.9.1 Définition des Paramètres Géométriques 61
III.9.2 Plan d'Expériences et Points de Design 63
III.9.3 Analyse par la Méthode de Taguchi 66
III.10Conclusion 67

IV Phase Améliorer :Elaboration du Cahier des Charges 68
IV.1 Introduction 68
IV.2 Élaboration du cahier des charges fonctionnel 68
IV.2.1 Méthodologie 68
IV.2.2 Critères éliminatoires (NO GO) 68
IV.2.3 Spécifications techniques minimales 69
IV.2.4 Matériaux compatibles requis 70
IV.2.5 Exigences de traçabilité et de conformité FST 70
IV.2.6 Qualification de la base de données matière — Processus NCAMP . 71
IV.2.7 Exigences contractuelles et pénalités 72
IV.3 Identification des solutions disponibles sur le marché 73
IV.4 Analyse comparative — Matrice de conformité 75
IV.4.1 Méthodologie d'évaluation 75
IV.4.2 Résultats de la matrice de conformité 76
IV.5 Matrice de décision pondérée 77
IV.6 Modélisation géométrique et préparation au benchmark 78
IV.6.1 Modèles géométriques des pièces 79
IV.7 Résultats du benchmark — Temps d'impression 80
IV.7.1 Données brutes communiquées par les fournisseurs 80
IV.7.2 Comparaison des coûts de fabrication 82
IV.8 Benchmark Interne 83

IV.9 Synthèse comparative — Coût unitaire final 85
IV.10Justification du choix final — Sara-Tech Africa / Fortus 450mc 86

V Phase Contrôler : Étude Économique et Retour sur Investissement . . 89
V.1 Introduction 89
V.2 Hypothèses et paramètres de calcul 89
V.2.1 Données pièces — source AMOS 2025 90
V.3 Modèle de calcul du coût de revient unitaire 90
V.3.1 générale — Coût de revient unitaire (MAD/pièce) 90
V.3.2 Calcul détaillé par pièce 91
V.4 Synthèse des coûts unitaires et annuels 91
V.5 Amortissement et Retour sur Investissement 92
V.5.1 Gain annuel net 92
V.5.2 Période de remboursement (Payback) 92
V.5.3 ROI sur 5 ans 93
V.5.4 Visualisation — Cash-flow cumulé 93
V.6 Comparaison des scénarios sur 5 ans 94
V.7 Synthèse des KPI financiers 94
V.8 Résultat 94

Conclusion générale 96

Bibliographie 97

Annexes 98
Annexe A — SPIM 98
AnnexeB—Grommet 98
Annexe C — PR FAB 99
Annexe D — Évaluation des réponses fournisseurs 99

Liste des figures

I.1 Logo de Royal Air Maroc 2
I.2 Les secteurs d'activité de la Royal Air Maroc 4
I.3 Chronologie des grandes étapes de la Royal Air Maroc (1957–2024) 5
I.4 Organigramme général de la Royal Air Maroc 7
I.5 Organisation de l'activité MRO au sein de la RAM 8
I.6 Maintenance des sièges dans l'atelier cabine 9
I.7 Poste pilotage 25-10 12
I.8 Compartiment Passager 25-20 13
I.9 Galley 25-30 13
I.10 Les lavatories ATA 25-40 13

II.1 Exemples de pièces cosmétiques de cabine 16
II.2 Flux d'approvisionnement actuel pour les pièces cosmétiques cabine 17
II.3 Pièce SPIM B787 17
II.4 Illustration de l'absence de grommet et de cover SFCU dans la flotte . . . 18
II.5 Décalage entre consommation réelle et MOQ OEM 19
II.6 Diagramme de Pareto — Valeur de consommation annuel des pièces cosmétiques 21

III.1 Schéma de principe du procédé FDM 24
III.2 Schéma d'extrudeur d'imprimante 3D FDM 25
III.3 Cadre, moteur pas à pas et carte mère d'une imprimante 3D 26
III.4 Schéma du principe de fonctionnement des procédés SLS 26
III.5 Détail du phénomène de frittage laser à l'échelle des particules de poudre . 27
III.6 Évolution du module de rigidité en fonction de la température 29
III.7 Visualisation des matériaux obtenus dans le graphe 1 sans limite 36
III.8 Zoom sur les 4 matériaux obtenus dans le graphe 1 avec limite 36
III.9 Visualisation des matériaux obtenus dans le graphe 2 sans limite 37
III.10 Zoom sur les 4 matériaux obtenus dans le graphe 2 avec limite 37

III.11Montage du test de flammabilité verticale et horizontale selon la CS-25 Annexe F éprouvette B787 AUDIO COVER BC (76,2 × 304,8 × 1,9 mm), test vertical à gauche 41
III.12Courbes TGA (lignes continues) et D-TGA (lignes pointillées) de l'ULTEM™ 9085 43
III.13Courbes TGA (lignes continues) et D-TGA (lignes pointillées) de l'ULTEM™ 9085 44
III.14Résultats du test de flammabilité verticale en fonction de la direction d'impression éprouvettes ULTEM™ 9085 à 100 % d'infill, épaisseur 2 mm, 1 couche pleine 46
III.15Courbes contrainte–déformation de l'ULTEM™ 9085 pour les trois directions 48
III.16Résistance à la traction, module de Young et allongement maximal de l'ULTEM™ 9085 en fonction de la direction d'impression (X, Y, Z) 49
III.17Déformation thermique en fonction de la température pour l'ULTEM™ 9085 50
III.18Courbes DSC de l'ULTEM™ 9085 (éprouvette imprimée et filament) . . . 51
III.19Accoudoir en état nominal 52
III.20Insert avant dégradation 53
III.21Rupture et arrachement de l'insert 53
III.22Maillage de l'insert d'accoudoir taille d'élément 0,1 mm dans les zones de concentration de contraintes, 0,2 mm dans les zones courantes 54
III.23Surfaces d'encastrement de l'insert d'accoudoir 54
III.24Surface de chargement et application de la pression passager pression uniforme de 0,5 MPa sur la face supérieure de l'insert 55
III.25Déformation totale $u_{\max} = 1{,}7$ mm à l'extrémité libre 57
III.26Contrainte équivalente de von Mises $\sigma_{\mathrm{vM,max}} = 80$ MPa $> R_e = 73$ MPa . . 57
III.27Zone critique 1 concentration de contrainte de von Mises 58
III.28Zone critique 2 concentration de contrainte de von Mises 58
III.29Zone critique 3 concentration de contrainte de von Mises 58
III.30Zone critique 4 concentration de contrainte de von Mises 58
III.31Zone critique 5 concentration de contrainte de von Mises 58
III.32Zone critique 6 concentration de contrainte de von Mises 58
III.33Surface de chargement pression de 0,5 MPa appliquée dans la direction -Y 59
III.34Déformation totale $u_{\max} = 0{,}55$ mm 59
III.35Contrainte équivalente de von Mises $\sigma_{\mathrm{vM,max}} = 77$ MPa $> \sigma_{y,\max} = 73$ MPa 60
III.36Zone critique 1 concentration de contrainte de von Mises 60
III.37Zone critique 2 concentration de contrainte de von Mises 60
III.38Zone critique 3 concentration de contrainte de von Mises, cas technicien . . 61

III.39Localisation du rayon F_1 sur la géométrie de l'insert 62
III.40Localisation du rayon F_2 sur la géométrie de l'insert 62
III.41Déclaration de F_1 comme paramètre d'entrée dans Design Modeler 62
III.42Déclaration de F_2 comme paramètre d'entrée dans Design Modeler 62
III.43Déclaration du facteur de sécurité minimal comme paramètre de sortie dans ANSYS Mechanical 63
III.44Chaîne de calcul paramétrique dans ANSYS Workbench F_1 et F_2 en entrée, FS en sortie 63
III.45Points de design dans ANSYS Workbench entrées F_1, F_2 et sorties FS . . 64

IV.1 LOGO NCAMP 71
IV.2 Imprimante 3D Stratasys Fortus 450mc — proposée par Sara-Tech Africa . 73
IV.3 Imprimante 3D Roboze 500 MR 74
IV.4 Imprimante 3D Intamsys 610 HT 75
IV.5 Imprimante 3D Markforged FX20 75
IV.6 Comparaison des scores pondérés des quatre fournisseurs 78
IV.7 Modèles géométriques CATIA des quatre pièces benchmark 80
IV.8 Comparaison des temps d'impression par pièce et par fournisseur 81
IV.9 Comparaison des Coûts d'impression par pièce et par fournisseur 82
IV.10Comparaison visuelle des coûts unitaires par pièce (Dh) 86
IV.11Imprimante 3D Stratasys Fortus 450mc — proposée par Sara-Tech Africa . 87

V.1 Comparaison coût FA unitaire vs prix OEM par pièce 92
V.2 Cash-flow cumulé net sur 5 ans — périmètre 8 pièces (MAD) 93
.3 Document SPIM 98
.4 Document Grommet 98
.5 Document PR FAB 99
.6 Extrait de l'évaluation des réponses fournisseurs 99

Liste des tableaux

I.1 Flotte actuelle de Royal Air Maroc 6
I.2 Nomenclature simplifiée des chapitres ATA 11
I.3 Nomenclature simplifiée des chapitres ATA 11
I.4 Principales sous-catégories de l'ATA 25 12

II.1 Fiche de consommation — SPIM B787 (source AMOS 2025) 17
II.2 Pièces à risque d'obsolescence identifiées en Gemba 20
II.3 Synthèse quantifiée des gaspillages identifiés en Gemba 20
II.4 Classement Pareto des pièces cosmétiques critiques sur cinq ans 21

III.1 Matrice de choix pondérée — FDM versus SLS (note de 1 à 5) 28
III.2 Classification des matériaux selon la norme UL-94 (du moins sévère au plus sévère) 30
III.3 Critères limites appliqués à la base de sélection 38
III.4 Propriétés et indices de performance des quatre matériaux candidats . . . 39
III.5 Critères d'acceptation du test vertical CS-25 Annexe F article (a)(1)(ii) . . 41
III.6 Températures des pics de dégradation de l'ULTEM™ 9085 (courbes D-TGA) 44
III.7 Paramètres des éprouvettes et conditions du test de flammabilité verticale 45
III.8 Conformité aux critères CS-25 Annexe F éprouvettes ULTEM™ 9085 . . 46
III.9 Résultats FST officiels Stratasys ULTEM™ 9085, test d'allumage vertical . 47
III.10 Propriétés tensiles de l'ULTEM™ 9085 selon la direction d'impression . . . 49
III.11 Coefficient de dilatation thermique (CTE) de l'ULTEM™ 9085 dans les trois directions d'impression, au-dessous et au-dessus de T_g 50
III.12 Impact économique annuel des ruptures d'inserts d'accoudoirs 52
III.13 Résultats des 40 simulations paramétriques 65
III.14 Effets principaux de Taguchi — Facteur F_1 66
III.15 Effets principaux de Taguchi — Facteur F_2 66
III.16 Synthèse Taguchi — Contribution relative des facteurs 67

IV.1 Critères NO GO — Éliminatoires 69
IV.2 Spécifications techniques minimales du CDC 70

IV.3 Systèmes matériau–machine de fabrication additive qualifiés ou en cours de qualification NCAMP 72
IV.4 Résultats sur les critères NO GO 76
IV.5 Analyse de conformité par catégorie (sélection représentative) 76
IV.6 Synthèse des scores de conformité globale (57 critères) 77
IV.7 Critères et pondérations de la matrice de décision 77
IV.8 Matrice de notation pondérée des quatre solutions 78
IV.9 Temps d'impression unitaires par fournisseur – résultats bruts 81
IV.10 Coût d'impression d'impression unitaires par fournisseur – résultats bruts . 82
IV.11 Paramètres communs à tous les fournisseurs 83
IV.12 Investissement total et coût horaire machine calculé 84
IV.13 Prix matière par pièce et par fournisseur (Dh/pièce) 84
IV.14 Calcul détaillé du coût unitaire par pièce et par fournisseur (Dh) 85
IV.15 Tableau de synthèse — Prix unitaire par pièce et par fournisseur (Dh) . . 85
IV.16 Justification structurée du choix final 87

V.1 Paramètres globaux — SAR-TECH Fortus 450mc 89
V.2 Catalogue des 8 pièces retenues pour la fabrication additive 90
V.3 Calcul détaillé du coût de revient unitaire des 8 pièces retenues 91
V.4 Tableau récapitulatif — Coût unitaire FA vs OEM et gains annuels 91
V.5 Évolution annuelle du cash-flow cumulé et du ROI (taux d'actualisation de 8 %) 93
V.6 Projection économique comparative sur 5 ans — périmètre 8 pièces 94
V.7 KPI financiers — SAR-TECH Fortus 450mc (8 pièces) 94

Liste des abréviations

AM	Additive Manufacturing (Fabrication Additive)
AMM	Aircraft Maintenance Manual
APTE	Application aux Techniques d'Entreprise.
ASTM	American Society for Testing and Materials
AOG	Aircraft On Ground
BAC	Boeing Aerospace Company Specification
CAD	Computer-Aided Design
CFR	Code of Federal Regulations
CMM	Component Maintenance Manual
DOA	Design Organization Approval
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EMI	École Mohammadia d'Ingénieurs
FAA	Federal Aviation Administration
FA	Fabrication Additive
FAR	Federal Aviation Regulations
FFF	Fused Filament Fabrication
FDM	Fused Deposition Modeling
FST	Fire, Smoke and Toxicity
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer
ISO	International Organization for Standardization
MRO	Maintenance, Repair and Overhaul
NDT	Non-Destructive Testing
OEM	Original Equipment Manufacturer
PA	Polyamide
PEEK	Polyether Ether Ketone
PEI	Polyetherimide
PLA	Polylactic Acid
PPSF	Polyphenylsulfone
PPSU	Polyphenylsulfone
RAM	Royal Air Maroc
ROI	Return on Investment
SLS	Selective Laser Sintering
UL94	Underwriters Laboratories 94

Introduction générale

Dans un contexte marqué par une forte pression sur les coûts de maintenance, la disponibilité des aéronefs et la maîtrise des chaînes d'approvisionnement, les compagnies aériennes sont amenées à rechercher continuellement des solutions innovantes permettant d'améliorer leur performance opérationnelle [8]. L'émergence de la fabrication additive, communément appelée impression 3D, représente aujourd'hui une opportunité majeure pour le secteur aéronautique grâce à sa capacité à produire rapidement des pièces complexes tout en réduisant les délais d'approvisionnement et les coûts de stockage [1, 2, 3, 4].

Au sein de Royal Air Maroc, certaines pièces cosmétiques de cabine présentent des contraintes récurrentes liées à leur disponibilité, à leur obsolescence ou encore aux quantités minimales de commande imposées par les fabricants d'origine. Ces contraintes peuvent engendrer des délais importants et impacter l'efficacité des opérations de maintenance. Dans ce contexte, l'intégration de la fabrication additive apparaît comme une alternative prometteuse permettant de produire localement certaines pièces tout en garantissant le respect des exigences techniques et réglementaires du secteur aéronautique.

L'objectif de ce projet est d'évaluer la faisabilité de l'implémentation de l'impression 3D au sein des activités MRO de Royal Air Maroc. Pour ce faire, une analyse du besoin a été menée afin d'identifier les pièces les plus pertinentes pour une production additive. Une étude comparative des technologies et des matériaux a ensuite été réalisée, suivie d'un benchmark des solutions disponibles sur le marché. Enfin, une analyse technico-économique a permis d'évaluer la rentabilité et les bénéfices potentiels de cette démarche.

Ce mémoire est structuré en cinq chapitres. Le premier présente Royal Air Maroc ainsi que son environnement de maintenance. Le deuxième expose la problématique et les besoins identifiés. Le troisième est consacré à l'étude des technologies de fabrication additive et à la sélection des matériaux. Le quatrième présente le benchmark des solutions et la démarche de choix de la technologie retenue. Enfin, le cinquième chapitre évalue la viabilité économique du projet à travers une analyse détaillée des coûts et des gains potentiels.