



Agence de Promotion
de l'Industrie et de l'Innovation

Fiche professionnelle de projet

« Fabrication additive de pièces pour le secteur aéronautique »



Soutenu par



Mise en oeuvre par



Avril 2025

SOMMAIRE

1. FICHE SYNTHÉTIQUE DU PROJET	04
2. PRÉSENTATION DU PROJET	05
2.1. DESCRIPTION DU PROJET.....	05
2.2. DÉFINITIONS CLEFS.....	07
2.3. JUSTIFICATION DE L'OPPORTUNITÉ.....	07
3. ANALYSE DU MARCHÉ	09
3.1. SEGMENTATION DE LA DEMANDE.....	09
3.2. MARCHÉ LOCAL.....	11
3.3. MARCHÉ INTERNATIONAL.....	14
3.4. LES PERSPECTIVES DE LA DEMANDE.....	26
3.5. STRATÉGIE MARKETING.....	31
4. COMPOSANTES TECHNIQUES DU PROJET	38
4.1. PROCESS ET BESOINS EN ÉQUIPEMENTS.....	38
4.2. ACTIVITÉS CLEFS.....	44
4.3. INTRANTS ET MATIÈRES PREMIÈRES.....	47
4.4. BESOINS EN RESSOURCES HUMAINES.....	49
4.5. INNOVATION ET DIGITALISATION.....	50
5. RÉGLEMENTATION, DURABILITÉ ET CERTIFICATIONS	53
5.1. NORMES ET RÉGLEMENTATION NATIONALES.....	53
5.2. NORMES ET RÉGLEMENTATION INTERNATIONALES.....	53
5.3. CONSIDÉRATIONS ENVIRONNEMENTALES.....	54
5.4. CERTIFICATIONS	56
6. ANALYSE SWOT DU PROJET	58
7. INVESTISSEMENT ET RENTABILITÉ PRÉVISIONNELLE	60
7.1. BESOINS EN INVESTISSEMENT ET FINANCEMENT.....	60
7.2. PRÉVISIONS D'ACTIVITÉ.....	62
7.3. PRÉVISIONS DE CHARGE.....	63
7.4. RENTABILITÉ.....	64
7.5. GESTION DES RISQUES.....	64
8. ANNEXES	66
8.1. ADRESSES UTILES DE QUELQUES FOURNISSEURS D'ÉQUIPEMENTS.....	66
8.2. ADRESSES UTILES DE QUELQUES FOURNISSEURS D'INTRANTS.....	67
8.3. PROJECTIONS DE RENTABILITÉ.....	69

ACRONYMES

3D	Trois Dimensions
APII	Agence de Promotion de l'Industrie et de l'Innovation
B2B	Business to Business
B2C	Business to Consumer
CA	Chiffre d'Affaires
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CRM	Customer Relationship Mangement
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
ERP	Entreprise Resource Planning
FA	Fabrication Additive
FAO	Fabrication Assistée par Ordinateur
FDM	Fused Deposition Modeling
GITAS	Groupement des Industries Tunisiennes Aéronautiques et Spatiales
INNOPRI	Institut National de la Normalisation et de la Propriété Industrielle (INNORPI)
INS	Institut National de la Statistiques
LFS	Low Force Stereolithography
LPBF	Laser Powder Bed Fusion (fusion laser sur lit de poudre métallique)
mDT	mille Dinars Tunisiens
MDT	Millions de Dinars Tunisiens

ACRONYMES

 SUITE

MES	Manufacturing Execution System
MRO	Maintenance, Repair and Operations
PAEK	Polyaryléther cétone
PEEK	Polyéther éther cétone
R&D	Recherche et Développement
SAV	Service Après-Vente
SH	Système Harmonisé
SLA	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
VAN	Valeur Actualisée Nette
TCAC	Taux de Croissance Annuel Composé
TRI	Taux de Rentabilité Interne
UE	Union Européenne
ULM	Ultra-Léger Motorisé
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing

1. Fiche synthétique du projet

Projet : Fabrication additive de pièces pour le secteur aéronautique	
Description	Le projet vise à établir une unité de fabrication additive en Tunisie, capable de produire des pièces complexes pour le secteur aéronautique. L'unité intégrera des technologies avancées de fabrication (notamment LPBF et WAAM), et ciblera en priorité le marché international.
Opportunité	Ce projet s'inscrit dans la dynamique de croissance du marché mondial de la fabrication additive aéronautique (+15% par an) et capitalise sur les avantages compétitifs de la Tunisie en termes de coûts et de position géographique stratégique.
Produits et services	<ul style="list-style-type: none"> • Pièces en fabrication additive pour l'aéronautique : Pièces métalliques complexes (technologie LPBF et WAAM) et pièces en polymères techniques. • Services d'ingénierie et de développement.
Investissement	Investissement Total : 30 MDT <ul style="list-style-type: none"> • Terrain et constructions : 2,5 MDT • Agencement et installations : 1,5 MDT • Equipements de production : 19 MDT • Equipements de contrôle et de laboratoire : 3 MDT • Autres : 1,5 MDT • FdR : 2,5 MDT
Financement	<ul style="list-style-type: none"> • Capital : 12 MDT • Crédit : 18 MDT
Capacité	19 200 heures de fabrication additive par an (6 machines en 2x8)
CA en régime de croisière	30 MDT dont 90% à l'export
Emplois	80 dont 25 cadres et 30 techniciens / agents de maîtrise
Rentabilité	<ul style="list-style-type: none"> • TRI : 21% • VAN : 6 425 mDT • Retour sur investissement : 5,2 ans

2. Présentation du projet

2.1. DESCRIPTION DU PROJET

Le projet vise à établir une unité de fabrication additive (impression 3D) de pièces destinées au secteur aéronautique en Tunisie. Cette initiative s'inscrit dans la stratégie de développement de l'industrie aéronautique tunisienne et vise à positionner le pays comme un acteur innovant dans la chaîne de valeur aéronautique mondiale.



Le projet comprend les éléments suivants :

- 1** Une unité de production équipée de systèmes de fabrication additive de pointe, capable de produire des pièces complexes en métal et en polymères techniques pour l'industrie aéronautique. Cette unité intégrera :
 - Des imprimantes 3D métal utilisant la technologie de fusion laser sur lit de poudre (LPBF) et la technologie WAAM (Dépôt de fil métallique) pour les pièces de grande dimension ;
 - Une imprimante 3D pour polymères techniques et composites.
 - Des équipements de post-traitement (traitement thermique, usinage de finition).
 - Des systèmes de contrôle qualité avancés.
- 2** Un bureau d'études et d'ingénierie pour :
 - La conception et l'optimisation topologique des pièces.
 - Le développement des paramètres de fabrication.
 - L'industrialisation des processus.
 - La qualification des pièces et des procédés.
- 3** Un laboratoire de contrôle qualité équipé de :
 - Systèmes de métrologie dimensionnelle.
 - Équipements de contrôle non destructif.
 - Machines de caractérisation des matériaux.
 - Systèmes de suivi et traçabilité.

4

Un service support intégrant :

- La maintenance des équipements.
- La gestion des poudres métalliques et autres consommables.
- Le suivi des certifications.
- L'assistance technique aux clients.

La gamme de produits sera divisée en trois segments principaux :

- **Pièces métalliques de structure** : composants optimisés topologiquement pour réduire le poids tout en conservant les propriétés mécaniques requises.
- **Pièces métalliques de systèmes complexes** : composants avec géométries intégrées difficile à réaliser par les méthodes conventionnelles et qui doivent répondre à des exigences mécaniques et/ou thermiques élevées.
- **Pièces en polymères techniques et composites** : composants nécessitant des matériaux spécifiques et des géométries complexes.

Les services associés comprendront :

- La co-conception et l'optimisation des pièces avec les clients.
- Le développement et la qualification des processus.
- La production de séries selon les besoins.
- Le contrôle qualité et la documentation complète.
- Le support technique et la formation.

2.2 DÉFINITIONS CLEFS

Dans le contexte de ce projet, il est important de clarifier certains termes techniques :

- **Fabrication additive (FA)** : Procédé de fabrication par ajout de matière, couche par couche, à partir d'un modèle numérique 3D.
- **LPBF (Laser Powder Bed Fusion)** : Technologie de fabrication additive métallique utilisant un laser pour fusionner sélectivement des couches de poudre métallique.

- **Optimisation topologique** : Méthode de conception qui optimise la distribution de matière dans un volume donné pour maximiser la performance tout en minimisant le poids.
- **Post-traitement** : Ensemble des opérations réalisées après la fabrication additive pour obtenir les propriétés finales requises (traitement thermique, usinage, etc.).
- **Qualification** : Processus de validation qu'une pièce et son processus de fabrication répondent aux exigences aéronautiques.

2.3. JUSTIFICATION DE L'OPPORTUNITÉ

Le projet de fabrication additive de pièces aéronautiques en Tunisie représente une opportunité stratégique majeure, justifiée par plusieurs facteurs clés :

1. Croissance du marché mondial : Le marché de la fabrication additive pour l'aéronautique connaît une croissance soutenue, avec des prévisions de +15% par an sur la période 2024-2030 (voir chapitre §3.3), portée par la demande croissante d'allègement des structures et d'optimisation des performances.

2. Présence d'une industrie aéronautique établie en Tunisie : Le pays compte déjà plus de 80 entreprises dans le secteur aéronautique, créant un écosystème favorable et une base de clients potentiels.

3. Innovation et montée en gamme technologique : La fabrication additive, en tant que technologie de rupture, représente une opportunité stratégique pour la Tunisie de :

- Se positionner sur des segments à forte valeur ajoutée de la chaîne de valeur aéronautique ;
- Développer une expertise distinctive dans une technologie d'avenir ;

- Renforcer la diversification de son industrie vers des activités plus complexes et innovantes ;
- Répondre aux nouvelles exigences du secteur en matière d'optimisation des performances et de durabilité.

4. Valorisation des compétences tunisiennes : Le projet permet de capitaliser sur les compétences techniques locales en ingénierie et en production de précision, tout en développant une expertise dans une technologie d'avenir.

5. Position géographique stratégique : La proximité avec l'Europe, second marché aéronautique mondial et partenaire commercial privilégié de la Tunisie, représente un atout stratégique. Cette proximité permet des coûts et des délais logistiques optimisés, une synchronisation plus aisée avec les chaînes d'approvisionnement européennes, ainsi qu'une réactivité accrue pour le support client.

3. Analyse du marché

3.1. SEGMENTATION DE LA DEMANDE

Le marché de la fabrication additive pour l'aéronautique se caractérise par une segmentation en plusieurs catégories d'acteurs, chacun ayant des besoins spécifiques en termes de pièces, de services et d'exigences techniques. Les principaux segments de la demande, ainsi que leurs spécificités sont récapitulés au tableau suivant :

Segment	Besoins techniques et de services associés
<p>Avionneurs : Constructeurs d'aéronefs intégrant les systèmes complets</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pièces de structure optimisées et allégées en titane et aluminium • Développement et qualification de nouveaux designs • Certification complète et documentation exhaustive • Production de petites et moyennes séries • Gammes privilégiées : Pièces de structure ; Systèmes complexes intégrés
<p>Équipementiers de rang 1 : Fournisseurs directs des avionneurs</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pièces de systèmes complexes avec fonctions intégrées • Performance thermique et mécanique optimisée • Co-développement et optimisation des designs • Gammes privilégiées : Échangeurs de chaleur ; Composants hydrauliques ; Systèmes de refroidissement intégrés
<p>Sous-traitants aéronautiques : Fabricants de pièces et sous-ensembles</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Amélioration de pièces existantes pour réduction des coûts ou du poids • Besoin d'alternatives aux procédés traditionnels (usinage, fonderie) • Production de moyennes séries • Formation et support pour transition vers la fabrication additive • Gammes privilégiées : Pièces moyenne complexité ; Composants non critiques pouvant bénéficier d'optimisation topologique

<p>Sociétés de MRO : Maintenance, Réparation et Révision</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pièces de rechange à la demande • Réactivité et délais courts • Documentation technique complète • Gammes privilégiées : Pièces de rechange obsolètes ; Composants urgents en petites séries
<p>Centres R&D et bureaux d'études</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Prototypes et pièces test • Innovation et développement de nouvelles applications • Support en conception et optimisation • Gammes privilégiées : Prototypes ; Pièces expérimentales ;
<p>Constructeurs d'aviation légère</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Petites séries de pièces spécialisées • Optimisation du ratio performance/coût • Certification adaptée à l'aviation légère • Gammes privilégiées : Pièces légères optimisées ; Composants structurels allégés.

Cette segmentation permet d'adapter l'offre de produits et services aux besoins spécifiques de chaque catégorie de clients, en tenant compte de leurs exigences en termes de :

- Complexité technique des pièces
- Volumes de production
- Niveaux de certification requis
- Besoins en services associés (conception, qualification, documentation)

➤ *Les différents segments présentent des potentiels de croissance variés et nécessitent des approches commerciales distinctes. La stratégie commerciale sera détaillée dans la section dédiée à la stratégie marketing.*

3.2. MARCHÉ LOCAL

3.2.1 L'offre sur le marché local

L'analyse de l'offre de fabrication additive pour le secteur aéronautique en Tunisie révèle une situation particulière. En effet, malgré un secteur aéronautique dynamique comptant plus de 80 entreprises, la capacité locale en fabrication additive qualifiée pour l'aéronautique est quasi-inexistante.

Le paysage actuel de la fabrication additive en Tunisie se caractérise par des acteurs de petite taille, peu structurés et orientés principalement vers le prototypage rapide et les applications non industrielles. Ces acteurs, qu'ils soient des startups, des Fab Labs, ou des centres techniques, disposent d'équipements d'impression 3D de base, inadaptés aux exigences du secteur aéronautique. À titre d'exemple, le centre d'excellence technologique du cluster MECADEV à Sfax s'est doté d'une imprimante utilisant la technologie LFS (Low Force Stereolithography) avec un volume d'impression conséquent (200 x 335 x 300mm). Bien qu'avancée pour le prototypage en résine, cette installation n'est pas qualifiée pour la production de pièces aéronautiques.

Cette situation contraste avec le développement significatif du secteur aéronautique tunisien, qui compte des acteurs majeurs comme Airbus Atlantic, Groupe Sfaran, Groupe Latécoère, Hutchinson, FEEZ, ... et de nombreux sous-traitants spécialisés dans l'usinage de précision, le traitement de surface, la fabrication de composants électriques/ électroniques et l'assemblage de sous-ensembles.

L'organisation actuelle de la production reflète ce manque de capacité locale en fabrication additive. Les pièces complexes nécessitant cette technologie sont produites en Europe, puis soit expédiées directement aux avionneurs, soit intégrées dans des sous-ensembles assemblés en Tunisie avant d'être réexportées. Ce schéma de production souligne un gap technologique important dans la chaîne de valeur locale.

- Cette configuration du marché met en lumière une opportunité stratégique pour le développement de capacités en fabrication additive métallique en Tunisie. Un tel développement permettrait non seulement d'intégrer de nouvelles opérations de production localement, mais aussi d'ouvrir des perspectives pour la fabrication de pièces actuellement importées. Plus important encore, cela pourrait créer des opportunités pour de nouveaux projets d'assemblage nécessitant des pièces en fabrication additive, renforçant ainsi la compétitivité globale du secteur aéronautique tunisien.

3.2.2 Demande locale local

L'analyse de la demande locale en fabrication additive pour le secteur aéronautique nécessite une approche à deux niveaux : d'abord, une compréhension approfondie du contexte industriel tunisien, et ensuite, une analyse de son intégration dans les chaînes de valeur mondiales.

L'examen du secteur aéronautique tunisien qui compte plus de 80 entreprises révèle plusieurs catégories d'acteurs potentiellement intéressés par la fabrication additive, tels que :

- Les filiales des grands groupes aéronautiques comme **Safran**, avec ses trois entités (Safran Seats, Safran Electrical & Power, Safran Cabin), **Airbus Atlantic** (ex-Stelia Aerospace) et **Latécoère** : Ces acteurs présentent un potentiel particulier car leurs maisons-mères maîtrisent déjà cette technologie. Leur présence pourrait faciliter l'adoption locale de la fabrication additive, d'autant qu'ils disposent des capacités techniques nécessaires et peuvent servir de références pour la qualification des processus.
- Les spécialistes de l'usinage et de la mécanique de précision : Des entreprises comme Mecachrome Tunisie, Ventana, EMP, AFC Industrie ou AD Industrie pourraient voir dans la fabrication additive une opportunité de compléter leur offre, d'optimiser certaines de leurs productions actuelles et de se différencier sur des pièces complexes.

Dans la configuration actuelle, le fonctionnement du secteur suit un modèle bien défini :

- Les spécifications et la conception des pièces sont définies par les donneurs d'ordres.
- Les pièces en fabrication additive sont actuellement produites en Europe.
- Les sites tunisiens interviennent principalement dans les phases d'assemblage et d'intégration

Face à cette organisation, le développement d'une capacité locale en fabrication additive pourrait suivre deux scénarios complémentaires :

• Scénario 1 : Intégration dans les chaînes existantes

- ➔ Qualification progressive des sites tunisiens pour la production de pièces déjà conçues.
- ➔ Volumes dépendant des stratégies de sourcing des grands groupes.
- ➔ Démarrage avec des pièces non critiques pour établir la confiance.

• Scénario 2 : Développement de nouvelles opportunités

- ➔ Localisation de nouvelles activités d'assemblage en Tunisie
- ➔ Projets d'optimisation de pièces existantes
- ➔ Développement dans la maintenance et la production de pièces de rechange
- ➔ Exploitation d'opportunités dans des segments spécifiques comme les ULM

Des segments particuliers comme la maintenance aéronautique (MRO) et la fabrication d'ULM pourraient constituer aussi des marchés de niche prometteurs.

Les acteurs de la maintenance comme Tunisair Technics et Sabena Technics Tunisia pourraient utiliser la fabrication additive pour la production rapide de pièces de rechange, particulièrement pour les avions vieillissants dont les pièces deviennent difficiles à sourcer. Pour ces acteurs, la fabrication additive pourrait être également une solution pour la réduction des stocks de pièces grâce à la production à la demande.

Les fabricants d'ULM (tels qu'Avionav) pourraient exploiter la fabrication additive pour le prototypage et la production de composants optimisés. Ce segment présente l'avantage d'avoir des exigences de certification moins contraignantes que l'aviation commerciale, et pourrait servir de marchés initiaux pour établir l'expertise en fabrication additive avant d'aborder des applications plus critiques.

Ainsi, nous estimons que la demande locale ne peut être évaluée de manière isolée, mais elle doit être considérée dans le cadre plus large des chaînes d'approvisionnement mondiales de l'industrie aéronautique. Le succès d'une unité de fabrication additive en Tunisie dépendra de sa capacité à s'intégrer dans ces chaînes globales tout en apportant une valeur ajoutée significative.

La concrétisation de ce potentiel pourrait suivre une progression en trois phases :

- Projets pilotes avec les grands groupes pour établir la crédibilité
- Extension aux acteurs de la mécanique de précision
- Diversification vers des applications spécifiques (maintenance, ULM)

- ➔ Cette approche graduelle permettra de construire la confiance et l'expertise nécessaires pour établir la Tunisie comme un acteur crédible dans la fabrication additive aéronautique, tout en respectant les contraintes et exigences spécifiques du secteur.

3.3 MARCHÉ INTERNATIONAL

3.3.1 Estimation du marché et perspectives d'évolution

L'analyse du marché de la fabrication additive pour l'industrie aéronautique révèle un secteur en pleine transformation, porté par une dynamique d'innovation et des besoins croissants en pièces optimisées. L'estimation précise de ce marché présente certaines complexités, notamment en raison de la distinction parfois floue entre les équipements de production et les pièces produites, ainsi que de la diversité des méthodologies utilisées par les différents cabinets d'études.

Selon Allied Market Research, le marché spécifique des pièces aéronautiques produites en fabrication additive était évalué à 1,38 milliard de dollars en 2020 et devrait atteindre 6,80 milliards de dollars d'ici 2030, avec un taux de croissance annuel composé de 18,4%. Cette progression reflète l'adoption croissante de cette technologie pour la production de composants aéronautiques critiques.

Cette croissance s'appuie sur plusieurs tendances de fond qui transforment profondément l'industrie aéronautique. En premier lieu, la recherche constante d'optimisation des performances et de réduction des coûts pousse les constructeurs et équipementiers à explorer le potentiel de la fabrication additive. GE Aviation illustre parfaitement cette tendance avec la production en série d'injecteurs de carburant pour le moteur LEAP, démontrant la maturité de la technologie pour des composants critiques.

Les différentes études de marché mettent en lumière plusieurs facteurs clés qui structurent cette croissance :

1 L'évolution des besoins du secteur

- Une demande croissante pour des pièces allégées, contribuant à l'amélioration de l'efficacité énergétique des aéronefs.
- Un besoin d'optimisation des chaînes d'approvisionnement, particulièrement mis en évidence par les perturbations récentes.
- La recherche de solutions pour réduire les stocks de pièces de rechange et les délais d'approvisionnement.

2 Les avancées technologiques

La maturation des technologies de fabrication additive permet désormais :

- La production de pièces répondant aux exigences strictes du secteur aéronautique.
- L'utilisation de matériaux de plus en plus performants.
- Une répétabilité et une fiabilité accrues des processus de fabrication.

3 L'évolution du cadre réglementaire

Le secteur bénéficie d'une structuration progressive :

- Développement de standards spécifiques pour la qualification des pièces
- Mise en place de processus de certification adaptés
- Acceptation croissante par les autorités de certification aéronautique

Les applications se diversifient également, touchant différents segments du marché :

- Les pièces de moteurs représentent environ 20% du marché, avec une croissance soutenue portée par les besoins d'optimisation thermique et de réduction de poids
- Les composants structurels constituent environ 25% du marché
- Les systèmes internes représentent 15% des applications
- Les pièces de rechange, segment particulièrement dynamique, représentent environ 30% du marché

➤ Cette répartition évolue constamment au fur et à mesure que de nouvelles applications sont qualifiées et que la technologie gagne en maturité.

Pour l'avenir, les analystes s'accordent sur des perspectives de croissance robustes, soutenues par :

- L'élargissement continu du spectre des applications possibles.
- L'amélioration constante des performances des procédés.
- La pression croissante pour la réduction des émissions dans le secteur aéronautique.
- Le besoin de flexibilité et de résilience dans les chaînes d'approvisionnement.

➤ Cette évolution devrait s'accompagner d'une transformation profonde des modèles de production, avec une tendance vers des chaînes de valeur plus distribuées et une production plus proche des points d'utilisation.

3.3.2 Principaux marchés

Le marché des pièces aéronautiques produites par fabrication additive présente une segmentation complexe qui reflète la diversité des applications et des besoins du secteur aéronautique.

✓ **Répartition par région**

L'Amérique du Nord, et particulièrement les États-Unis, occupe une position dominante sur ce marché, représentant environ 35-40% de la demande mondiale. Cette position s'explique par :

- La présence des grands donneurs d'ordre comme Boeing, GE Aviation, et Lockheed Martin.
- Un écosystème d'innovation particulièrement développé.
- Des investissements importants en R&D.
- Une adoption précoce de la technologie pour les applications aéronautiques.

L'Europe constitue le second pôle majeur, avec une part significative du marché mondial. La région se distingue par :

- La présence d'acteurs clés comme Airbus et Safran
- Une forte expertise dans les applications « moteur et systèmes »
- Des programmes de recherche coordonnés à l'échelle européenne
- Une approche structurée de la qualification des procédés

L'Asie-Pacifique émerge comme la région la plus dynamique en termes de croissance, portée notamment par :

- Le développement rapide de l'industrie aéronautique en Chine
- Des investissements massifs dans les nouvelles technologies
- L'émergence de nouveaux acteurs dans le secteur aérospatial

✓ **Segmentation par branche d'industrie**

Le segment de l'aviation commerciale domine actuellement le marché. Cette position s'explique par plusieurs facteurs :

- Une demande croissante en composants optimisés pour réduire la consommation de carburant.
- Des volumes de production plus importants que dans les autres segments.
- Une maturité croissante des applications, notamment pour les pièces moteurs.

Le secteur spatial, bien que représentant une part plus modeste en valeur, montre la croissance la plus dynamique. Il se caractérise par :

- Des besoins spécifiques en pièces hautement optimisées.
- Une plus forte acceptation des technologies innovantes.
- Des volumes plus faibles mais une plus forte valeur ajoutée par pièce.

Le segment des drones émerge comme un domaine d'application prometteur, porté par :

- Une plus grande liberté dans la conception des pièces.
- Des cycles de développement plus courts.
- Une moindre contrainte réglementaire que dans l'aviation commerciale.

✓ **Segmentation par application**

Les composants moteurs représentent un segment majeur du marché, avec des applications comme :

- Les chambres de combustion
- Les systèmes d'injection
- Les échangeurs thermiques
- Les systèmes de refroidissement

Les composants structurels constituent également un segment significatif, incluant :

- Les supports et fixations optimisés
- Les pièces de jonction complexes
- Les éléments de structure allégés

Les pièces de rechange forment un segment en forte croissance, répondant à plusieurs enjeux critiques du secteur aéronautique :

- La gestion des stocks représente un défi majeur pour les compagnies aériennes et les MRO, avec des coûts logistiques et d'immobilisation importants. La fabrication additive permet une production à la demande qui réduit significativement ces coûts de stockage.
- L'obsolescence des pièces constitue un problème croissant, particulièrement pour les flottes vieillissantes. La FA offre une solution viable en permettant la reproduction de pièces dont les fournisseurs d'origine ont arrêté la production ou disparu.
- Les délais d'approvisionnement traditionnels, pouvant atteindre plusieurs mois, génèrent des coûts d'immobilisation importants pour les opérateurs. La production locale par FA permet de réduire drastiquement ces délais et de minimiser les temps d'immobilisation des appareils.

✓ **Segmentation par technologie d'impression**

Le marché se caractérise par une diversité de technologies de fabrication additive, chacune ayant ses applications spécifiques.

Le procédé de fusion laser sur lit de poudre métallique (LPBF), dont les variantes SLM et DMLS sont les plus répandues, domine les applications critiques aéronautiques, représentant selon certaines études près de la moitié du marché des pièces en 2023. Cette position s'explique par :

- Sa capacité à produire des pièces métalliques complexes avec des propriétés mécaniques répondant aux exigences strictes de l'aéronautique, particulièrement pour les composants moteurs et les pièces structurelles critiques.
- L'excellente qualité et répétabilité du processus, essentielles pour la certification aéronautique.
- La possibilité de travailler avec une large gamme d'alliages qualifiés pour l'aéronautique (titane, inconel, aluminium).

La technologie EBM (Electron Beam Melting) se positionne sur des applications spécifiques :

- Particulièrement adaptée pour les alliages de titane utilisés dans les composants structurels
- Offrant des vitesses de fabrication plus élevées pour certaines applications
- Permettant de travailler avec des températures plus élevées, ce qui réduit les contraintes résiduelles

Le procédé de projection de poudre (DED -Directed Energy Deposition) trouve sa place pour :

- La réparation de pièces métalliques
- La fabrication de pièces de grande dimension
- L'ajout de caractéristiques sur des pièces existantes

Pour les applications non métalliques, les technologies comme le SLA (stéréolithographie) et le FDM trouvent leur utilité principalement dans :

- Le prototypage rapide
- Les outillages et gabarits
- Certaines pièces non structurelles de l'aménagement cabine

Cette diversité technologique continue d'évoluer avec :

- Le développement de nouvelles variantes de procédés plus performantes
- L'amélioration continue des systèmes de contrôle et de monitoring
- L'automatisation croissante des processus de fabrication

✓ **Segmentation selon le matériau**

Le marché se segmente principalement entre :

- Les alliages de titane, particulièrement pour les applications structurelles (supports de mât moteur, attaches voilure, pièces de train d'atterrissage, ...) et moteur (aubes de turbine, carters, pièces de compresseur, ...)
- Les superalliages base nickel pour les applications haute température (chambres de combustion, injecteurs de carburant, composants de turbine, pièces des systèmes d'échappement, ...)
- Les alliages d'aluminium pour les composants moins critiques (Pièces de structure secondaire telles que les supports d'équipements et les fixations, boîtiers électroniques, pièces de climatisation, supports de sièges, structures de rangements, ...)
- Les polymères techniques pour certaines applications spécifiques : Conduits de ventilation optimisés, boîtiers de protection d'équipements, pièces d'aménagement cabine personnalisées, ...

➡ *Cette segmentation par matériau continue d'évoluer à mesure que le secteur gagne en maturité. L'émergence de nouvelles applications pousse au développement de matériaux aux propriétés toujours plus performantes, tandis que l'évolution des besoins des donneurs d'ordre stimule la qualification de nouveaux alliages. En parallèle, le développement des technologies de fabrication ouvre la voie à l'utilisation de matériaux jusqu'alors difficiles à mettre en œuvre, enrichissant constamment le spectre des possibilités offertes par la fabrication additive dans l'aéronautique.*

3.3.3 Principaux acteurs dans le monde

L'écosystème des acteurs de la fabrication additive aéronautique révèle une structuration en plusieurs catégories, chacune ayant développé des approches distinctes dans l'utilisation de cette technologie.

✓ **Les constructeurs aéronautiques majeurs**

- **Boeing** s'est imposé comme un pionnier dans l'intégration de la fabrication additive pour la production de composants aéronautiques. Le constructeur américain a développé une approche progressive, qui se manifeste à travers plusieurs réalisations majeures : plus de 300 références de pièces sont aujourd'hui produites en FA sur ses différents programmes, notamment des composants structurels sur le 787. Cette stratégie d'adoption s'accompagne d'un effort continu d'extension vers de nouvelles applications critiques.
- **Airbus** a également fait de la fabrication additive un axe majeur de sa stratégie industrielle. Le constructeur européen démontre son engagement par une intégration massive sur l'A350, où plus de 1000 pièces sont produites en FA. Cette adoption s'étend progressivement à l'ensemble de sa gamme, couvrant un spectre d'applications qui va des composants cabine aux pièces structurelles.

✓ **Les acteurs de la propulsion**

- **GE Aviation** s'est positionné comme le leader incontesté dans l'utilisation de la FA pour les composants moteur. Cette position s'illustre par plusieurs réalisations emblématiques : la production en série d'injecteurs de carburant pour le moteur LEAP constitue une première mondiale dans l'utilisation de la FA pour des composants critiques en grande série. Le motoriste a également intégré de nombreux composants optimisés dans la famille de moteurs GE9X, démontrant ainsi la maturité de la technologie pour les applications les plus exigeantes.
- **Safran**, à travers ses différentes divisions (Safran Aircraft Engines en partenariat avec GE pour la famille de moteurs LEAP, Safran Landing Systems, Safran Nacelles), exploite la FA pour diverses applications. Le groupe a notamment développé des compétences spécifiques dans la production de composants complexes pour les systèmes de propulsion et d'équipements. Cette expertise se traduit par des applications concrètes dans les systèmes de combustion, les circuits de carburant et divers composants critiques.

✓ **Les équipementiers spécialisés**

- Spirit AeroSystems illustre parfaitement l'adoption réussie de la FA par les équipementiers de premier rang. L'entreprise a développé une expertise particulière dans la production de composants structurels complexes, qui se manifeste à travers plusieurs réalisations significatives : la fabrication de pièces de grande dimension pour les structures d'avions, l'optimisation topologique de composants critiques pour réduire le poids des avions, et le développement de solutions innovantes combinant performance structurelle et allègement.
- Collins Aerospace a adopté une approche diversifiée dans l'utilisation de la FA, ciblant plusieurs domaines d'application stratégiques. Cette stratégie se concrétise notamment dans trois domaines clés : les systèmes cabine où la FA permet une personnalisation accrue, les systèmes environnementaux où l'optimisation des géométries améliore les performances, et les trains d'atterrissage où la FA permet d'optimiser certains composants critiques.

✓ **Les spécialistes et nouveaux entrants**

Le marché voit également émerger des acteurs spécialisés qui redéfinissent les frontières de la FA aéronautique. Parmi ces entreprises innovantes, plusieurs se distinguent par des approches particulièrement audacieuses :

- Relativity Space révolutionne l'approche traditionnelle de la fabrication des lanceurs spatiaux. L'entreprise a développé un concept unique de production où la FA n'est plus simplement une technologie complémentaire mais devient le cœur du processus de fabrication. Cette approche se concrétise par la production de lanceurs dont plus de 90% des composants sont réalisés en fabrication additive.
- BEAMIT représente une nouvelle génération de sous-traitants spécialisés en FA. Le groupe italien a développé une expertise pointue dans la production de composants aéronautiques complexes, illustrée par sa collaboration stratégique avec Leonardo. Cette coopération a notamment permis la qualification et l'installation de plus de 100 pièces sur différents programmes aéronautiques.

✓ **Évolution du paysage concurrentiel**

La maturation du marché s'accompagne d'une évolution des facteurs de différenciation entre les acteurs. Cette compétition s'articule autour de plusieurs axes stratégiques :

- La maîtrise du processus de qualification constitue un avantage concurrentiel majeur. Les acteurs doivent démontrer leur capacité à répondre aux exigences strictes du secteur aéronautique, à travers des processus robustes et documentés.
- L'optimisation des designs pour la FA devient un facteur clé de succès. Les entreprises développent des expertises spécifiques dans la reconception de pièces existantes et la conception de nouvelles pièces tirant pleinement parti des possibilités offertes par la FA.
- La capacité à produire en série avec une qualité constante s'impose comme un prérequis incontournable. Les acteurs investissent massivement dans des systèmes de contrôle et de suivi pour garantir la répétabilité des processus.

➤ *Cette structuration du marché suggère une évolution vers une plus grande consolidation, particulièrement dans le segment des services spécialisés. Néanmoins, la dynamique d'innovation du secteur continue d'offrir des opportunités pour l'émergence de nouveaux acteurs, notamment sur des niches technologiques ou applicatives spécifiques.*

3.3.4 Echanges mondiaux

L'analyse des échanges mondiaux de pièces aéronautiques produites en fabrication additive présente des particularités qui la rendent complexe à quantifier précisément. En effet, dans les nomenclatures douanières (système harmonisé), il n'existe pas de code spécifique permettant de tracer les pièces produites en FA, celles-ci étant classées selon leur fonction dans l'aéronef indépendamment de leur procédé de fabrication. Néanmoins, l'analyse des flux peut être appréhendée de manière qualitative à travers l'étude des chaînes de valeur du secteur aéronautique.

✓ Principaux flux d'échanges

L'Amérique du Nord, et particulièrement les États-Unis, apparaît comme le premier producteur de pièces aéronautiques en FA, portée par :

- La présence des grands donneurs d'ordre (Boeing, GE Aviation)
- Une concentration importante de capacités de production avancées
- Une avance technologique dans certaines applications critiques comme les pièces moteur.

L'Europe constitue le second pôle majeur de production, avec :

- Une forte capacité de production autour des sites d'Airbus et de ses principaux équipementiers
- Une expertise particulière dans certaines applications comme les pièces structurelles complexes
- Un réseau dense de sous-traitants spécialisés

Les échanges entre ces deux zones sont significatifs et bidirectionnels, reflétant :

- L'internationalisation des chaînes d'approvisionnement aéronautiques
- Les spécialisations complémentaires développées par les acteurs
- Les stratégies de double source pour les pièces critiques

✓ Dynamiques émergentes

L'évolution des capacités de production en fabrication additive pour l'aéronautique s'inscrit dans le contexte plus large du développement de l'industrie aéronautique mondiale.

En Asie, plusieurs initiatives concrètes émergent :

- La Chine développe progressivement ses capacités en FA dans le cadre de son plan "Made in China 2025", avec un focus particulier sur les applications aéronautiques. Par exemple, l'utilisation de pièces en titane imprimées en 3D sur le C919 témoigne de cette montée en compétence.
- Singapour s'est positionnée comme un hub technologique en FA, notamment à travers son National Additive Manufacturing Innovation Cluster (NAMIC) qui développe des applications spécifiques pour l'aéronautique.

En ce qui concerne les autres régions, les développements sont plus limités et s'inscrivent davantage dans une logique de support :

- Plusieurs centres de maintenance aéronautique commencent à explorer les applications de la FA pour la production de pièces de rechange
- Des initiatives locales émergent pour développer des capacités de prototypage rapide
- Certaines zones aéronautiques traditionnelles cherchent à intégrer la FA dans leur offre de services, mais ces développements restent à un stade préliminaire

➤ *Cette émergence de nouvelles capacités reste cependant concentrée sur quelques pôles spécifiques où se conjuguent expertise technique, infrastructures industrielles et présence d'acteurs aéronautiques majeurs.*

✓ **Tendances d'évolution**

Les flux d'échanges sont en cours de transformation sous l'effet de plusieurs facteurs :

- Une tendance à la régionalisation de la production, favorisée par la nature digitale de la FA
- L'émergence de réseaux de production distribuée
- La recherche de résilience dans les chaînes d'approvisionnement post-Covid
- Le développement de capacités locales de production à proximité des grands centres de maintenance

3.4. LES PERSPECTIVES DE LA DEMANDE

3.4.1 Perspectives sur le marché international

L'analyse des perspectives de la demande en pièces aéronautiques produites par fabrication additive révèle des dynamiques de croissance différenciées selon les segments et les applications.

Dans le secteur de l'aviation commerciale, les perspectives de demande sont portées par plusieurs facteurs structurels :

- ◆ La croissance attendue des livraisons d'avions neufs, avec selon Boeing et Airbus une demande de plus de 40 000 nouveaux appareils d'ici 2040.
- ◆ La recherche constante d'optimisation du rapport poids/performance des aéronefs, où la FA offre des solutions uniques.
- ◆ Le besoin de rationalisation des chaînes d'approvisionnement et de réduction des stocks de pièces de rechange.

L'adoption de la FA devrait suivre une progression par étapes :

- ◆ Extension continue des applications qualifiées sur les programmes existants.
- ◆ Intégration plus poussée dès la conception sur les nouveaux programmes.
- ◆ Développement des applications pour le support et la maintenance.

Dans le secteur spatial : Ce segment présente les perspectives de croissance les plus dynamiques, stimulées par :

- ◆ L'émergence du "New Space" et la multiplication des acteurs.
- ◆ Les besoins spécifiques en pièces optimisées pour les lanceurs et satellites.
- ◆ Une plus grande acceptation des technologies innovantes.

Les applications se développent particulièrement dans :

- ◆ Les systèmes de propulsion.
- ◆ Les structures optimisées de satellites.
- ◆ Les composants de systèmes spécifiques au spatial.

Dans le secteur de la défense, la demande est portée par des besoins spécifiques :

- ◆ L'optimisation des performances des aéronefs militaires.
- ◆ La recherche d'autonomie dans les chaînes d'approvisionnement.
- ◆ Le support des flottes en opération.

✔ **Facteurs clés d'évolution**

L'évolution de la demande sera façonnée par l'interaction de plusieurs facteurs structurants.

- Sur le plan technologique, nous assistons à une maturation continue des procédés qui ouvre de nouvelles possibilités. La qualification de nouveaux matériaux, notamment des alliages spécifiquement développés pour la FA, permet d'envisager des applications jusqu'ici hors de portée. En parallèle, l'amélioration des performances des procédés, tant en termes de précision que de répétabilité, renforce la confiance des donneurs d'ordre dans cette technologie.
- Le cadre réglementaire joue également un rôle crucial dans cette évolution. Les autorités de certification aéronautique développent progressivement des standards adaptés aux spécificités de la FA. Cette structuration réglementaire, bien que progressive, est essentielle pour permettre une adoption plus large de la technologie. L'émergence de standards partagés au niveau international facilitera également la diffusion des bonnes pratiques et la qualification des processus.
- Les considérations économiques restent naturellement au cœur des décisions d'adoption. La recherche constante d'optimisation des coûts pousse les acteurs à explorer le potentiel de la FA, non seulement pour la réduction du poids des pièces mais aussi pour la rationalisation des chaînes d'approvisionnement. La possibilité de produire à la demande et au plus près des besoins ouvre des perspectives de transformation profonde des modèles logistiques traditionnels.

✓ Trajectoire d'évolution

L'adoption de la FA dans l'industrie aéronautique devrait suivre une progression par phases distinctes.

- Dans l'immédiat, nous observons une phase de consolidation où les applications existantes se renforcent et se multiplient progressivement. Les acteurs capitalisent sur leur expérience acquise pour étendre prudemment le périmètre des pièces produites en FA, tout en développant activement les applications dans le domaine de la maintenance.
- À l'horizon 2027-2029, nous devrions assister à une accélération significative de l'adoption. Les nouveaux programmes aéronautiques intégreront la FA dès leur conception, permettant d'exploiter pleinement le potentiel de cette technologie. En parallèle, l'émergence de réseaux de production distribuée transformera progressivement les chaînes de valeur traditionnelles. Cette période verra probablement aussi la multiplication des applications critiques, la technologie ayant prouvé sa fiabilité.
- Au-delà de 2030, les perspectives s'élargissent considérablement. Nous pourrions assister à une généralisation de la FA pour certaines catégories de pièces où ses avantages seront devenus incontestables. Les modèles de production pourraient connaître une transformation profonde, avec l'émergence de nouvelles approches combinant production centralisée et distribuée. Des applications aujourd'hui inimaginables pourraient également émerger, portées par les avancées continues de la technologie et l'évolution des besoins du secteur aéronautique.

➤ *Cette évolution progressive mais profonde du secteur s'accompagnera vraisemblablement d'une transformation des compétences et des organisations. Les acteurs devront développer de nouvelles expertises, repenser leurs processus et adapter leurs stratégies industrielles pour tirer pleinement parti des possibilités offertes par la FA.*

3.4.2 Les perspectives sur le marché local

L'évolution future du marché tunisien de la fabrication additive aéronautique doit être analysée dans le contexte spécifique de l'industrie aéronautique locale et de son positionnement dans les chaînes de valeur mondiales.

Le développement d'une capacité locale en fabrication additive pourrait suivre plusieurs trajectoires complémentaires :

- Intégration dans les chaînes de valeur existantes : L'écosystème aéronautique tunisien, déjà bien établi avec plus de 80 entreprises, pourrait bénéficier de l'introduction de capacités en FA pour monter en valeur ajoutée. Cette évolution permettrait :
 - ◆ L'intégration de nouvelles étapes de production actuellement réalisées à l'étranger
 - ◆ Le développement de capacités locales de prototypage et d'industrialisation
 - ◆ Une plus grande autonomie dans la réalisation de certains outillages et équipements de production

- Développement de nouvelles opportunités : Le marché pourrait s'enrichir de nouveaux services et applications :
 - ◆ Support aux activités de maintenance aéronautique existantes en Tunisie
 - ◆ Développement de capacités de production rapide pour les besoins urgents
 - ◆ Services de prototypage et d'optimisation pour l'écosystème local

La concrétisation de ces opportunités dépendra de plusieurs facteurs clés, à savoir :

- **La montée en compétences** : Le développement d'expertises locales en conception pour la FA, en qualification des processus et en contrôle qualité sera déterminant pour permettre cette évolution.
- **L'accompagnement des donneurs d'ordre** : Leur implication dans le transfert de technologie et la qualification des processus conditionnera largement le rythme de développement des applications locales.
- **Le développement des infrastructures techniques et réglementaires** : L'accès aux équipements, aux matériaux qualifiés et la mise en place de processus de certification adaptés seront nécessaires pour permettre une montée en puissance des activités.

➤ *Cette évolution du marché local s'inscrira nécessairement dans une logique progressive, avec une première phase de développement des compétences et des infrastructures, suivie d'une diversification progressive des applications en fonction de la maturité acquise.*

3.5. STRATÉGIE MARKETING

La stratégie marketing pour ce projet de fabrication additive aéronautique doit être soigneusement élaborée pour répondre aux spécificités d'un marché exigeant et en pleine évolution.

3.5.1 Positionnement produit / service

Le projet vise à établir une offre de services en fabrication additive métallique répondant aux standards internationaux les plus exigeants du secteur aéronautique. Cette offre s'articule autour de trois axes complémentaires, permettant d'accompagner les clients à différents stades de leurs besoins en fabrication additive.

✔ *Services de production*

La production représente le cœur de l'offre, avec une approche progressive visant à établir la crédibilité technique de l'entreprise :

- La production initiale se concentrera sur des pièces non critiques, permettant d'établir la confiance des donneurs d'ordre tout en maîtrisant les processus de fabrication. Ceci pourrait concerner les catégories de pièces suivantes :
 - ◆ Supports et fixations simples pour systèmes cabine.
 - ◆ Pièces d'interface et d'adaptation pour les équipements.
 - ◆ Éléments d'outillage et gabarits de production.
 - ◆ Composants simples pour l'aménagement intérieur.

- À mesure de la qualification des processus, l'offre évoluera vers des pièces plus complexes, notamment des composants optimisés topologiquement tels que :
 - ◆ Supports structurels optimisés pour les systèmes embarqués.
 - ◆ Pièces de circuits de refroidissement avec canaux intégrés.
 - ◆ Composants de systèmes hydrauliques optimisés
 - ◆ Éléments de fixation complexes pour les structures secondaires.

- Une capacité de production en petites et moyennes séries sera développée, avec un focus particulier sur la répétabilité et la documentation qualité. Ceci concernera :
 - ◆ Séries de 10 à 100 pièces pour les composants standards qualifiés
 - ◆ Production à la demande de pièces de rechange
 - ◆ Lots de pièces optimisées pour des applications spécifiques
 - ◆ Composants personnalisés pour des configurations particulières

➤ *Cette montée en puissance progressive permettra de construire une expérience solide tout en maîtrisant les risques techniques et réglementaires.*

✓ **Services d'ingénierie et développement**

L'expertise en ingénierie constitue un élément différenciant essentiel, permettant d'accompagner les clients dans l'exploitation optimale de la fabrication additive :

- L'accompagnement en conception pour la fabrication additive permettra aux clients d'exploiter pleinement le potentiel de la technologie.
- Le service d'optimisation de pièces existantes visera à améliorer les performances tout en réduisant les coûts.
- La qualification des processus et des pièces suivra les standards aéronautiques les plus stricts.
- Une documentation technique exhaustive accompagnera chaque développement, répondant aux exigences du secteur.

✓ **Services de prototypage et R&D**

Le volet innovation permettra aux clients d'explorer de nouvelles applications tout en minimisant les risques :

- Les services de prototypage rapide permettront la validation rapide des concepts avant leur industrialisation.
- Le développement de nouvelles applications sera soutenu par une expertise technique pointue.
- Un support dédié aux activités R&D des clients facilitera l'émergence d'applications innovantes.

Cette offre complète cible prioritairement trois segments :

Les filiales tunisiennes des équipementiers de rang 1 (comme Safran, Airbus Atlantic, Latécoère) :

- ◆ Ces acteurs ont des besoins en pièces de systèmes complexes avec fonctions intégrées
- ◆ Leurs maisons-mères maîtrisent déjà la FA et peuvent faciliter la qualification des processus
- ◆ La proximité géographique permettra un support réactif dans leurs projets d'optimisation.

• Les sociétés de MRO (Maintenance, Réparation et Révision) comme Tunisair Technics et Sabena Technics Tunisia :

- ◆ Besoins en pièces de rechange à la demande
- ◆ Nécessité de réactivité et délais courts
- ◆ Production de pièces obsolètes ou urgentes en petites séries

• Les constructeurs d'aviation légère (comme AVIONAV) :

- ◆ Besoins en petites séries de pièces spécialisées
- ◆ Exigences de certification moins contraignantes
- ◆ Opportunité de développer une expertise sur des applications moins critiques

3.5.2 Stratégie de prix

La stratégie de prix doit refléter le positionnement haut de gamme du projet tout en restant compétitive. Elle doit être adaptée aux différents segments de clientèle et types de prestations, tout en tenant compte des contraintes spécifiques du secteur aéronautique.

Pour les équipementiers de rang 1 : La tarification pour ce segment stratégique s'articulera autour de plusieurs composantes :

- ◆ Les projets de développement et qualification feront l'objet de prix spécifiques incluant:
 - Les coûts d'industrialisation et de qualification du processus
 - Les essais et la documentation nécessaires à la certification
 - Un partage des coûts de développement sur les premières séries
- ◆ La production série sera basée sur :
 - Un prix unitaire dégressif selon les volumes
 - L'intégration des coûts matière qui représentent une part significative
 - Les coûts des contrôles et de la documentation qualité exigée

Pour les sociétés de MRO : Une tarification adaptée aux spécificités de la maintenance sera mise en place :

- ◆ Pour les pièces de rechange urgentes :
 - Un prix premium justifié par la réactivité et les petites séries
 - L'intégration des coûts de qualification accélérée
 - Une tarification tenant compte du degré d'urgence
- ◆ Pour les pièces obsolètes :
 - Un prix intégrant les coûts d'ingénierie inverse si nécessaire
 - La valorisation du service de prolongation de vie des équipements
 - Une tarification reflétant l'alternative aux solutions traditionnelles

Pour les constructeurs d'aviation légère : Une politique tarifaire plus souple sera appliquée:

- ◆ Pour le prototypage et développement :
 - Des forfaits d'accompagnement en conception
 - Une tarification progressive selon la complexité des pièces
 - Des prix attractifs pour les phases de validation
- ◆ Pour la production :
 - Des prix adaptés aux petites séries
 - Une structure de coûts simplifiée reflétant des exigences de certification moindres
 - Des formules packagées incluant conception et production

Cette stratégie de prix évoluera en fonction de :

- La montée en compétences et en références
- L'évolution des coûts des matériaux et des technologies
- Le positionnement de la concurrence
- La maturité du marché local

➔ *L'objectif est d'établir un équilibre entre la valorisation de l'expertise développée et la nécessité de rester compétitif pour permettre le développement du marché.*

3.5.3 Canaux de distribution

La distribution des services de fabrication additive pour l'aéronautique s'organisera principalement en direct, approche la plus adaptée au caractère technique et aux exigences élevées du secteur.

- Équipe commerciale technique : Un canal direct sera privilégié à travers une équipe commerciale spécialisée constituée par :
 - ◆ Des ingénieurs commerciaux dédiés par segment de marché : Un responsable grands comptes pour les équipementiers de rang 1, un spécialiste dédié au secteur MRO et un support technique pour l'aviation légère
 - ◆ Une équipe technique support intervenant en appui pour les aspects conception et faisabilité, définition des cahiers des charges, études technico-économiques, ...
- Plateforme digitale collaborative : Une interface digitale sécurisée complétera le dispositif commercial et comportera :
 - ◆ Un portail client permettant le suivi en temps réel des projets et productions, l'accès à la documentation technique et la gestion des commandes et de la traçabilité.
 - ◆ Des outils collaboratifs pour le partage des modèles 3D et des spécifications, la validation des étapes clés, ainsi que les échanges techniques avec les équipes projet.

Cette organisation directe des canaux de distribution vise à garantir :

- Une proximité technique permanente avec les clients
- Une réactivité maximale dans le traitement des demandes
- Un support expert à chaque étape des projets
- Une traçabilité complète des échanges et validations

Distribution des pièces de rechange

Pour le segment spécifique des pièces de rechange, une approche mixte sera adoptée. Au-delà de la relation directe avec les MRO, des partenariats seront développés avec des acteurs spécialisés de la distribution :

Les plateformes de commerce électronique B2B spécialisées en aéronautique (comme Aeroxchange, PartsBase, ou ILS) offrent une visibilité accrue auprès d'une clientèle internationale. Une présence sélective sur ces plateformes permettra de toucher des clients MRO au-delà du marché local, particulièrement pour les pièces déjà qualifiées et référencées.

Les distributeurs spécialisés en pièces aéronautiques peuvent également constituer un canal complémentaire intéressant. Ces acteurs disposent :

- D'une connaissance approfondie du marché des pièces de rechange
- De réseaux de distribution établis
- D'une expertise dans la gestion des aspects réglementaires et documentaires
- D'une capacité à gérer la logistique internationale.

Cette approche multi-canal pour les pièces de rechange présente plusieurs avantages :

- Une extension de la portée commerciale au-delà du marché local
- Une mutualisation des efforts de commercialisation
- Un accès à une expertise complémentaire en distribution aéronautique
- Une réduction des coûts logistiques et administratifs pour certaines zones géographiques

Cependant, cette distribution indirecte sera limitée aux pièces standards et qualifiées, les développements spécifiques et les pièces critiques continuant à être traités en direct avec les clients.

3.5.4 Stratégie de communication

La stratégie de communication pour un service de fabrication additive aéronautique doit allier crédibilité technique et proximité avec l'écosystème local. Elle s'articule autour de trois axes complémentaires, chacun répondant à des objectifs spécifiques :

- **Communication technique et expertise** : L'établissement de la crédibilité technique constitue le fondement de la stratégie de communication. Cette crédibilité sera construite à travers :
 - Une documentation technique rigoureuse présentant les capacités de production, les matériaux et procédés qualifiés, ainsi que les différentes certifications obtenues.
 - Une présence active dans les événements professionnels du secteur, notamment les salons aéronautiques tunisiens et régionaux, ainsi que les journées techniques spécialisées où l'expertise pourra être démontrée et partagée.
- **Actions commerciales ciblées** : Les actions commerciales seront adaptées aux spécificités et besoins de chaque segment de clientèle.
 - Pour les équipementiers de rang 1, l'approche privilégiera des présentations techniques personnalisées, des visites des installations avec démonstrations, et des workshops d'introduction à la FA pour leurs équipes.

- Les sociétés de MRO bénéficieront de démonstrations centrées sur leurs problématiques spécifiques de maintenance et de pièces de rechange, ainsi que de sessions d'information / formation sur les opportunités d'introduction de la FA.
- Quant aux constructeurs d'aviation légère, ils seront accompagnés dans l'identification des opportunités d'application de la FA à leurs besoins particuliers (Présentation des avantages coûts/performances).
- **Ancrage dans l'écosystème local** : Le projet s'inscrira résolument dans le développement du secteur aéronautique tunisien. Cette implication se traduira par une participation active aux structures professionnelles comme le GITAS. Au-delà de ces aspects institutionnels, une attention particulière sera portée à la valorisation des réussites locales et au partage d'expérience au sein de la communauté aéronautique tunisienne.



La mise en œuvre de cette stratégie de communication évoluera naturellement avec la maturation du projet. Les premiers succès et références obtenus viendront enrichir le discours, tandis que le développement des capacités techniques permettra d'aborder des applications toujours plus complexes. Cette évolution s'adaptera également à la progression de la compréhension et de l'acceptation de la fabrication additive dans le secteur aéronautique local.

4. Composantes technique du projet

4.1. PROCESS ET BESOINS EN ÉQUIPEMENTS

Dans une unité de fabrication additive pour l'aéronautique, deux types de processus coexistent:

- ➔ **Le processus de qualification** : Il constitue un préalable indispensable pour toute nouvelle pièce. Il suit un protocole rigoureux validé par les donneurs d'ordre et les autorités de certification, comprenant le développement des paramètres, la fabrication de pièces prototypes, les essais de validation et la documentation complète. Ce processus de qualification sera détaillé dans la section "Activités clés" du projet car il constitue une activité transverse majeure.
- ➔ **Le processus de production série**, qui s'applique une fois la qualification obtenue, constitue le cœur de l'activité opérationnelle.

Le processus de production suit une séquence d'étapes rigoureusement contrôlées, détaillées comme suit :

1. Conception et ingénierie :

Cette phase initiale passe par les étapes suivantes :

• Conception assistée par ordinateur :

La conception s'appuie principalement sur CATIA V5/V6 ou Siemens NX, qui constituent les standards de l'industrie aéronautique. Ces outils sont intégrés dans un système PLM permettant une gestion rigoureuse des données techniques. La modélisation 3D prend en compte dès le départ les spécificités de la fabrication additive, notamment les contraintes d'orientation, de supports et d'épaisseurs minimales.



• Optimisation topologique :

L'optimisation est réalisée via des logiciels spécialisés comme Altair Inspire ou Ansys Level Set. Le processus débute par la définition précise des contraintes mécaniques et conditions aux limites. S'ensuit une optimisation itérative visant à minimiser la masse tout en respectant les critères de performance mécanique. Chaque itération est analysée pour garantir la fabricabilité des géométries générées. Cette étape permet généralement des gains de masse de 30 à 50% par rapport aux conceptions traditionnelles.



• *Simulation numérique :*

Différentes simulations sont réalisées pour valider la conception. Les analyses structurales par éléments finis, réalisées sous Ansys ou Abaqus, confirment le comportement mécanique des pièces optimisées. Des simulations thermiques du processus, utilisant des suites logicielles spécialisées comme Additive Suite, permettent de prédire et minimiser les déformations et contraintes résiduelles. Cette étape est cruciale pour optimiser l'orientation des pièces et la conception des supports.

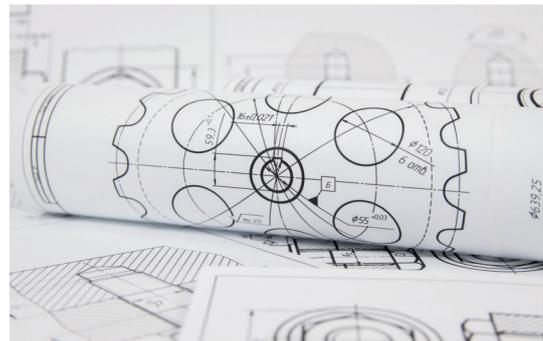


2. Préparation de la fabrication :

Cette phase assure la transition entre la conception numérique et la fabrication physique :

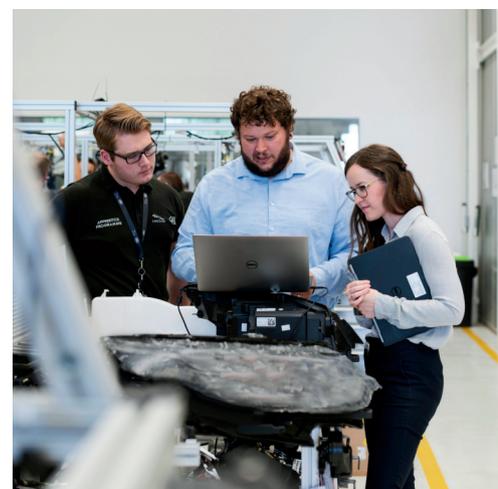
• *Préparation des fichiers de fabrication :*

Le modèle CAO optimisé est converti en format STL puis traité par des logiciels spécialisés comme Materialise Magics ou 3DXpert. Ces outils permettent de vérifier l'intégrité du fichier, réparer les éventuels défauts de maillage et ajuster les paramètres de tranchage. La définition de l'épaisseur des couches, typiquement entre 20 et 60 microns selon les applications, impacte directement la qualité finale des pièces.



• *Planification de la production :*

L'optimisation du placement des pièces sur le plateau de fabrication est réalisée via des algorithmes spécialisés. Cette étape prend en compte les contraintes thermiques, l'accessibilité pour l'enlèvement des pièces et l'optimisation du taux de remplissage du plateau. La génération des supports, cruciale pour la réussite de la fabrication, est optimisée pour minimiser la matière utilisée tout en garantissant une dissipation thermique adéquate.



- **Préparation des matériaux**

La gestion des poudres métalliques suit un processus rigoureux. Les poudres neuves sont caractérisées (granulométrie, fluidité, composition) avant utilisation. Le recyclage des poudres non fusionnées implique un tamisage précis, typiquement à 63 microns, et un contrôle de la contamination. L'ensemble du processus se déroule en atmosphère contrôlée pour éviter toute oxydation ou contamination.



3. Fabrication additive :

Le processus de fabrication constitue le cœur de l'activité, avec une focalisation sur différentes technologies selon les applications :

- **a) Fusion laser sur lit de poudre (LPBF) :** Cette technologie principale nécessite une préparation minutieuse de la machine. Le plateau de construction est soigneusement mis à niveau, avec une tolérance de planéité inférieure à 30 microns. L'atmosphère de la chambre est contrôlée avec un taux d'oxygène maintenu sous 0.1%. Le processus de construction implique la fusion sélective de couches successives de poudre métallique par un laser de 400 à 1000W. Un système de monitoring en temps réel surveille les paramètres critiques : puissance laser, température du bain de fusion, épaisseur des couches déposées,...
- **b) Dépôt de fil métallique (WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing) :** Cette technologie complémentaire est utilisée pour les pièces de plus grandes dimensions ou nécessitant des taux de dépôt élevés. Le processus utilise un arc électrique pour fondre un fil métallique, avec des vitesses de dépôt pouvant atteindre 4-8 kg/h. Le contrôle de la température inter-passes et de la protection gazeuse est crucial pour maintenir la qualité métallurgique.
- **c) Fabrication additive polymères hautes performances :** Pour les applications non structurales ou les outillages, des systèmes de frittage laser de polymères (SLS) sont utilisés. Les matériaux comme le PEEK ou le PEKK offrent une excellente résistance thermique et chimique. Le processus nécessite un contrôle précis de la température de la chambre de fabrication, maintenue juste en dessous du point de fusion du matériau.

4. Post-traitement :

Les opérations post-fabrication sont essentielles pour atteindre les propriétés finales requises :

a) Traitements thermiques : Le relâchement des contraintes s'effectue dans des fours sous atmosphère contrôlée. Pour les alliages de titane, un traitement typique implique un maintien à 800°C pendant 4 heures. Les traitements CIC (Compression Isostatique à Chaud) sont utilisés pour les pièces critiques, éliminant la porosité résiduelle sous 1000 bars et 920°C.

b) Parachèvement mécanique : L'enlèvement des supports utilise des techniques d'usinage conventionnel ou d'électroérosion selon leur accessibilité. La finition des surfaces est réalisée par différents procédés : sablage contrôlé, polissage robotisé, usinage des surfaces fonctionnelles, etc. Les zones nécessitant des tolérances précises sont reprises sur des centres d'usinage 5 axes.

c) Finitions spéciales : Certaines applications nécessitent des traitements supplémentaires : traitement de surface par anodisation pour les pièces en aluminium, revêtements anti-usure, traitement thermochimique pour améliorer les propriétés superficielles, etc.

5. Contrôle qualité :

Le processus de contrôle qualité suit un protocole rigoureux conforme aux exigences aéronautiques :

a) Contrôles dimensionnels : La métrologie dimensionnelle s'effectue sur une machine de mesure tridimensionnelle de haute précision (précision de 2 microns + L/300). La numérisation 3D par scanner optique complète ces mesures pour les surfaces complexes. Les données sont comparées au modèle CAO original avec génération automatique de cartographies des écarts. Les zones critiques font l'objet de mesures spécifiques par des moyens conventionnels calibrés.

b) Contrôles non destructifs : *Plusieurs techniques sont employées selon les exigences :*

- La tomographie aux rayons X permet une inspection volumétrique complète des pièces, détectant les porosités internes jusqu'à 50 microns
- Le ressuage fluorescent identifie les défauts débouchants selon les normes aéronautiques
- Le contrôle par ultrasons vérifie l'intégrité des zones critiques
- La radiographie numérique complète ces contrôles pour les zones complexes

c) Caractérisation des propriétés mécaniques : Des éprouvettes témoins sont fabriquées avec chaque lot de production. Les essais incluent :

- Tests de traction pour déterminer la résistance mécanique, la limite d'élasticité et l'allongement
- Essais de fatigue pour valider le comportement en service
- Mesures de dureté sur les différentes faces des pièces
- Analyse métallographique pour vérifier la microstructure

d) Validation documentaire : La documentation qualité comprend :

- L'ensemble des paramètres de fabrication enregistrés
- Les rapports de contrôle dimensionnel et non destructif
- Les résultats des essais mécaniques
- La traçabilité complète des matériaux et des processus
- Les certificats de conformité selon les normes aéronautiques

Les principaux équipements à prévoir, pour une capacité adaptée aux objectifs du projet, sont les suivants :

ETAPE DU PROCÉDÉ	PRINCIPAUX ÉQUIPEMENTS MATÉRIELS ET IMMATÉRIELS
<p>Conception et ingénierie</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Stations de travail (Processeurs multi-cœurs et mémoire RAM étendue pour les calculs complexes, cartes graphiques professionnelles pour le traitement 3D, ...) • Système de sauvegarde et archivage sécurisé des données • Infrastructure réseau haut débit • Équipements pour la caractérisation des poudres : Analyseur de granulométrie laser, testeur de fluidité Hall, microscope électronique à balayage pour l'analyse morphologique, équipement de mesure de la densité apparente, etc.
<p>Préparation de la fabrication</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Équipements de préparation des plateaux : Instruments de contrôle de planéité et de rugosité ; Équipement de sablage/grenaillage ; ... • Équipements de préparation et recyclage des poudres : Centrale de tamisage automatique ; Système de séchage des poudres ; Mélangeur pour homogénéisation des lots ; Système de transfert sécurisé des poudres ; • Équipements de contrôle environnemental : Système de traitement d'air ; Système de contrôle et maintien de la température et de l'humidité • Équipements de sécurité dédiés : Système d'aspiration ATEX ; Dispositifs de détection et d'extinction automatique ; Équipements de protection collective pour la manipulation des poudres

<p>Fabrication additive</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Machine principale de fusion laser sur lit de poudre avec : Système LPBF de grande capacité (plateau 250x250mm minimum) ; Laser fibre de puissance 400-1000W ; Système de filtration et recyclage des poudres intégré ; • Machine WAAM pour les pièces de grandes dimensions • Imprimante SLS pour polymères hautes performances • Système robotisé de chargement/déchargement des plateaux • Unité de stockage et de préparation des gaz inertes
<p>Post-traitement</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Four de traitement thermique sous atmosphère contrôlée (volume 1m³, T°max 1200°C) • Autres équipements thermiques : Four de détente des contraintes ; Système de refroidissement contrôlé • Équipements de parachèvement : Centre d'usinage 5 axes pour la finition des surfaces fonctionnelles ; Machine d'électroérosion à fil pour la découpe des supports ; Cabine de sablage automatisée ; Équipements de polissage robotisé • Équipements pour traitements de surface : Installation d'anodisation pour les pièces en aluminium ; Équipements de nettoyage et dégraissage ; Systèmes d'application de revêtements spéciaux
<p>Contrôle et métrologie</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Métrologie dimensionnelle : Machine de mesure tridimensionnelle de haute précision ; Scanner 3D optique haute résolution ; Équipements de métrologie conventionnelle calibrés ; Logiciels d'analyse et de comparaison 3D • Équipements de contrôle non destructif : Système de tomographie à rayons X industrielle ; Équipement de ressuage fluorescent ; Installation de contrôle par ultrasons ; Équipement de radiographie numérique • Laboratoire d'essais mécaniques : Machine d'essais universelle (traction, compression, flexion) ; Duromètres ; Équipement de préparation métallographique ; Microscope optique et système d'analyse d'image
<p>Manutention et stockage</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pont roulant 2 tonnes pour la manipulation des plateaux • Chariots élévateurs spécialisés • Systèmes de stockage sécurisé pour les poudres • Équipements de transport interne des pièces

➔ L'investissement total estimé pour ces équipements sera détaillé dans la partie financière du projet, avec un phasage possible des acquisitions selon la montée en charge de l'activité.

4.2. ACTIVITÉS CLEFS

La réussite d'une unité de fabrication additive aéronautique repose sur la maîtrise de plusieurs activités stratégiques, chacune contribuant de manière essentielle à la création de valeur et à la satisfaction des exigences du secteur.

4.2.1 R&D et ingénierie

Cette activité constitue le moteur d'innovation du projet, combinant recherche appliquée et développement de solutions concrètes pour l'industrie aéronautique. Elle ne se limite pas à l'adaptation de pièces existantes mais vise à exploiter pleinement le potentiel de la fabrication additive à travers une démarche structurée de recherche et développement.

La R&D se concentre sur plusieurs axes fondamentaux : l'exploration de nouveaux matériaux et leurs comportements en fabrication additive, le développement de paramètres de fabrication optimisés, et la recherche de nouvelles applications innovantes. Cette activité de recherche s'appuie sur une veille technologique continue et des collaborations avec des laboratoires spécialisés.

L'optimisation des pièces représente un défi complexe où recherche et ingénierie se conjuguent. Il ne s'agit pas simplement de reproduire des géométries existantes, mais de repenser entièrement les pièces pour tirer parti des libertés offertes par la FA. Cette activité mobilise des compétences pointues en conception générative et en optimisation topologique, permettant des gains significatifs en masse tout en améliorant les performances mécaniques.

Le support technique aux clients constitue une composante essentielle, où les résultats de la R&D se transforment en solutions concrètes.

Les ingénieurs accompagnent les donneurs d'ordre dans l'identification des applications pertinentes, dans l'adaptation des designs, et dans la validation des solutions proposées. Cette collaboration étroite permet non seulement d'optimiser les pièces mais aussi d'orienter les axes de recherche vers les besoins réels du marché.

L'amélioration continue des processus s'appuie sur une analyse systématique des données de production et des retours d'expérience, créant une boucle vertueuse entre recherche et applications industrielles. Cette démarche permet d'affiner les paramètres de fabrication, d'optimiser les stratégies de construction, et de développer des solutions innovantes pour les défis techniques rencontrés.

Cette activité combinée de R&D et d'ingénierie se révèle stratégique car elle :

- Crée une différenciation technologique face à la concurrence
- Développe une expertise unique valorisable auprès des clients
- Permet d'anticiper et d'influencer les évolutions technologiques du secteur
- Génère un patrimoine technique protégeable
- Contribue à l'optimisation continue des coûts de production

4.2.2 Qualification et certification

Cette activité est particulièrement critique pour la fabrication additive, technologie encore récente dans ce secteur exigeant. Elle implique une démarche progressive et méthodique structurée comme suit :

• Développement et la validation des paramètres de fabrication :

Cette phase requiert une expertise pointue combinant connaissance des matériaux, maîtrise des procédés et compréhension des exigences aéronautiques. Chaque couple matériau/géométrie nécessite un programme de développement spécifique, documenté de manière exhaustive. La validation implique non seulement les aspects techniques, mais aussi la démonstration de la répétabilité et de la robustesse du processus.

• Qualification auprès des donneurs d'ordre :

Elle nécessite la production de pièces prototypes et d'échantillons selon des plans de qualification rigoureux. Ces pièces subissent une batterie de tests et validations : essais mécaniques étendus, analyses métallurgiques approfondies, tests environnementaux. Chaque étape est documentée dans des dossiers de qualification qui constituent la base du référentiel technique de l'entreprise.

• Certification finale par les autorités aéronautiques :

Elle exige la démonstration d'une maîtrise totale de la qualité, depuis l'approvisionnement des matières premières jusqu'aux contrôles finaux. Le maintien de ces certifications nécessite une vigilance constante et des audits réguliers.

La dimension stratégique de la qualification/certification se manifeste à plusieurs niveaux :

- Elle constitue d'abord la clé d'entrée indispensable sur le marché aéronautique, aucune pièce ne pouvant être mise en production sans avoir franchi ces étapes de validation.
- La complexité et la durée du processus de qualification créent également une barrière à l'entrée significative, protégeant les acteurs établis de la concurrence opportuniste.
- Une fois acquise, cette expertise en qualification devient un avantage compétitif durable car elle combine des éléments difficiles à reproduire : expérience accumulée, référentiel technique documenté, reconnaissance des donneurs d'ordre.
- Enfin, les investissements importants nécessaires, tant en équipements qu'en compétences humaines, renforcent la position des entreprises ayant réussi à maîtriser cette activité.

4.2.3 Production

- L'aspect stratégique de cette activité repose sur la maîtrise simultanée de plusieurs dimensions critiques. La planification de la production requiert une orchestration précise des ressources, tenant compte non seulement des contraintes techniques, mais aussi de l'optimisation des coûts et des délais. Les décisions de placement des pièces sur les plateaux de fabrication, par exemple, impactent directement la productivité et la rentabilité des opérations.
- La gestion des matières premières, particulièrement des poudres métalliques, constitue un enjeu majeur. Au-delà de leur coût élevé, ces matériaux nécessitent des procédures strictes de manipulation, de stockage et de recyclage. La traçabilité complète, depuis la réception des lots jusqu'à leur utilisation finale, est absolument critique pour maintenir les qualifications aéronautiques.
- Le pilotage des équipements demande une expertise pointue. Les opérateurs doivent maîtriser non seulement les paramètres de fabrication, mais aussi être capables d'interpréter les données de monitoring en temps réel pour garantir la qualité des productions. Cette activité s'appuie sur un système qualité robuste, avec des procédures détaillées et des points de contrôle à chaque étape.

4.2.4 Management et contrôle qualité

Le management de la qualité dans la fabrication additive aéronautique va bien au-delà d'une simple fonction de contrôle. Cette activité irrigue l'ensemble de l'organisation et constitue un pilier essentiel de la performance.

Le système qualité s'articule autour de deux dimensions complémentaires. Le management de la qualité établit et fait vivre un système documenté répondant aux exigences des normes aéronautiques (EN 9100, etc.). Il définit les processus, les responsabilités et les interactions, garantissant ainsi une approche systémique de la qualité.

Le contrôle qualité, quant à lui, assure la vérification concrète de la conformité à chaque étape.

Il s'appuie sur des équipements de contrôle sophistiqués et des équipes hautement qualifiées. Cette fonction développe et met en œuvre les plans de contrôle, depuis la validation des matières premières jusqu'aux tests finaux des pièces produites.

Cette activité, loin d'être une simple fonction support, constitue un véritable avantage compétitif. Elle permet non seulement de garantir la conformité des produits, mais contribue également à l'amélioration continue des processus et à l'optimisation des coûts de production. La réputation d'excellence qui en découle devient un actif stratégique, particulièrement précieux dans un secteur où la confiance des donneurs d'ordre s'acquiert sur le long terme.

4.2.5 Supply Chain et gestion des matières critiques

- Cette fonction s'articule autour de deux axes majeurs. D'une part, la gestion des approvisionnements en poudres métalliques, matériaux hautement techniques et coûteux, nécessite une expertise pointue. La sélection et la qualification des fournisseurs, le contrôle des lots à réception, et la gestion optimale des stocks constituent des éléments critiques. Le recyclage des poudres non utilisées doit également être géré avec une rigueur particulière pour maintenir la traçabilité et la qualité requise.
- D'autre part, la planification et la gestion des flux revêtent une importance capitale. L'organisation des approvisionnements doit tenir compte des délais souvent longs pour les matières qualifiées, tout en optimisant les niveaux de stocks de ces matériaux coûteux. La coordination avec les clients, particulièrement pour les commandes urgentes de pièces de rechange, requiert une flexibilité et une réactivité importantes.
- La dimension stratégique de cette activité se manifeste à plusieurs niveaux. La maîtrise des approvisionnements en matières premières qualifiées constitue une barrière à l'entrée significative. La capacité à gérer efficacement ces flux complexes tout en maintenant des coûts compétitifs devient un avantage concurrentiel déterminant. De plus, l'optimisation de la chaîne logistique contribue directement à la performance globale de l'entreprise, tant en termes de délais que de coûts de production.

4.3. INTRANTS ET MATIÈRES PREMIÈRES

La fabrication additive pour l'aéronautique nécessite des matières premières répondant à des spécifications très strictes. Les principaux intrants et matières premières comprennent :

● **POUDRES MÉTALLIQUES**

Les poudres métalliques constituent l'intrant principal pour la fabrication additive. Leur qualité impacte directement les propriétés des pièces :

- **Alliages de titane (Ti6Al4V)** : Principalement utilisés pour les composants structurels où le rapport résistance/poids est critique, ainsi que pour les pièces soumises à des contraintes mécaniques importantes nécessitant une bonne résistance à la corrosion.
- **Superaliages base nickel (Inconel 718, 625)** : Ces alliages sont essentiels pour les composants exposés à des températures élevées, particulièrement dans les applications moteur et les systèmes d'échappement où la résistance aux hautes températures est primordiale.
- **Alliages d'aluminium (AlSi10Mg)** : Destinés aux pièces de structure secondaire et aux composants nécessitant une bonne conductivité thermique, ces alliages sont privilégiés dans les applications où la légèreté est un critère essentiel.

GAZ TECHNIQUES

- **Gaz inertes (Argon, Azote)** : Essentiels pour maintenir une atmosphère contrôlée pendant la fabrication, ces gaz permettent d'éviter l'oxydation des poudres métalliques lors de la fusion. L'argon, en particulier, est utilisé pour les alliages réactifs comme le titane.
- **Gaz de protection des zones de stockage** : Nécessaires pour la conservation des poudres et la protection des zones sensibles, ils contribuent à maintenir une atmosphère sèche et inerte dans les espaces de stockage.

POLYMÈRES HAUTES PERFORMANCES

Ces matériaux, bien que représentant une part mineure de l'activité, complètent la gamme pour des applications spécifiques où les polymères présentent des avantages en termes de poids, de coût ou de facilité de mise en œuvre. Il s'agit surtout des matières suivantes :

- **Polyéther éther cétone (PEEK)** : Ce polymère haute performance est utilisé pour des pièces non structurales nécessitant une excellente résistance thermique et chimique, notamment pour des composants de systèmes de conditionnement d'air ou des pièces de cabine.
- **Polyaryléther cétone (PAEK)** : Destiné aux applications nécessitant une bonne résistance mécanique combinée à une stabilité dimensionnelle à haute température, particulièrement pour des supports d'équipements ou des boîtiers de protection.
- **Polyamide chargé de fibres (PA12-CF)** : Ce matériau composite est utilisé pour des pièces techniques nécessitant légèreté et rigidité, comme certains conduits optimisés ou des supports non structurels.

OUTILLAGES ET SUPPORTS

- **Plateaux de fabrication** : En acier ou en aluminium, spécialement traités pour assurer une bonne adhérence des pièces et résister aux cycles thermiques répétés.
- **Outillages de post-traitement** : Incluent les outils spécifiques pour l'enlèvement des supports, les montages d'usinage et les gabarits de contrôle adaptés à chaque type de pièce.

CONSOMMABLES DE POST-TRAITEMENT

Ils incluent les produits pour traitements thermiques (gaz spéciaux pour les fours de traitement thermique, consommables associés aux procédés de détente et de densification, etc.), ainsi que les médias de finition (abrasifs pour le sablage, consommables de polissage, produits de nettoyage, ...).

CONSOMMABLES POUR LE CONTRÔLE

Il s'agit, par exemple, des produits pour contrôle non destructif (liquides pénétrants, révélateurs et produits de ressuage fluorescent, ...) et des consommables de métrologie (étalons de référence, consommables de calibration, ...)

4.4. BESOINS EN RESSOURCES HUMAINES

Pour atteindre les objectifs fixés pour ce projet, une équipe de 80 personnes sera nécessaire, dont :

- 25 cadres ;
- 30 techniciens et agents de maîtrise ;
- 25 opérateurs qualifiés

Les besoins en ressources humaines sont estimés comme suit :

NIVEAU	NOMBRE	DÉTAILS
Direction et administration	7	<ul style="list-style-type: none"> • Directeur général (1) • Directeur financier (1) • Responsable RH (1) • Responsable Système Qualité (1) • Comptable (1) • Assistants administratifs (2)
R&D Ingénierie et qualification	8	<ul style="list-style-type: none"> • Directeur technique (1) • Ingénieurs conception et CAO (2) • Ingénieurs matériaux et procédés FA (3) • Ingénieurs qualification et certification (2)
Méthodes et industrialisation	5	<ul style="list-style-type: none"> • Responsable méthodes (1) • Ingénieurs méthodes (2) • Programmeurs FAO (2)
Production	40	<ul style="list-style-type: none"> • Chef de production (1) • Responsable planification (1) • Chefs d'équipes (5) • Opérateurs machines FA qualifiés (15) • Techniciens FA et paramétrage (4) • Techniciens post-traitement et finition (10) • Opérateurs polyvalents (4)
Maintenance	4	<ul style="list-style-type: none"> • Responsable maintenance (1) • Techniciens maintenance et électroniciens (3)

Contrôle qualité et Laboratoire	7	<ul style="list-style-type: none"> • Responsable qualité (1) • Techniciens contrôle qualité (3) • Techniciens CND (3)
Commercial et support technique	5	<ul style="list-style-type: none"> • Directeur marketing et commercial (1) • Ingénieurs commerciaux (2) • Techniciens support clients (2)
Supply Chain et appro	4	<ul style="list-style-type: none"> • Responsable logistique et Achats (1) • Gestionnaire matières premières (1) • Magasiniers qualifiés (2)

La structure proposée est adaptée aux spécificités d'une activité de fabrication additive pour l'aéronautique, avec une forte proportion de personnel qualifié compte tenu :

- Du niveau technologique élevé des équipements
- Des exigences de qualité du secteur aéronautique
- De la complexité des processus de fabrication et de contrôle
- De l'importance de la R&D et de l'ingénierie

L'organisation prévoit un fonctionnement en 2x8 pour la production, avec possibilité d'extension en 3x8 selon les besoins.

4.5. INNOVATION ET DIGITALISATION

Bien que la fabrication additive soit par nature une activité innovante et fortement digitalisée, l'approche du projet doit tenir compte du contexte spécifique d'une entreprise en démarrage, avec des ressources initiales limitées et un écosystème local d'innovation encore en développement.

Innovation technologique

La stratégie d'innovation sera pragmatique et progressive, se concentrant sur des objectifs réalistes et atteignables :

- **Optimisation des processus existants** : Plutôt que de viser le développement de nouveaux matériaux qui nécessiterait des investissements considérables en R&D, le projet se concentrera sur la maîtrise et l'optimisation des paramètres de fabrication pour les matériaux qualifiés existants. Cela impliquera un travail méthodique de caractérisation et d'amélioration des processus, en collaboration avec les fournisseurs de poudres et les clients.
- **Conception optimisée** : L'effort d'innovation portera principalement sur l'optimisation topologique des pièces existantes, domaine où une réelle valeur ajoutée peut être apportée sans nécessiter d'investissements massifs en R&D. Les outils de conception disponibles seront utilisés pour proposer des re-designs innovants permettant des gains en performance et en coût.
- **Partenariats ciblés** : Des collaborations seront établies avec des écoles d'ingénieurs tunisiennes et éventuellement des centres techniques pour des projets d'innovation ciblés et réalistes, notamment dans l'optimisation des process et l'analyse des données de production.

Digitalisation

L'approche de la digitalisation sera structurée et progressive, s'appuyant sur les outils essentiels identifiés dans le chapitre 4.1 :

Conception et préparation : Le projet déploiera les logiciels standards de l'industrie, notamment CATIA ou Siemens NX pour la conception, et les suites logicielles spécialisées comme Materialise Magics pour la préparation des fichiers de fabrication. Ces outils constitueront le socle de la digitalisation, permettant une intégration complète de la chaîne numérique depuis la conception jusqu'à la fabrication.

Production : Le monitoring en temps réel des paramètres de fabrication sera assuré par les systèmes intégrés aux machines de fabrication additive. Les données collectées seront analysées pour optimiser les processus et assurer la traçabilité requise par l'industrie aéronautique, sans nécessiter dans un premier temps des développements complexes en intelligence artificielle.

Qualité : Les équipements de contrôle (machine de mesure tridimensionnelle, tomographie) seront connectés à une base de données centralisée, permettant une gestion rigoureuse des données qualité et de la documentation technique. L'analyse des données s'appuiera initialement sur des outils statistiques standards avant d'évoluer progressivement vers des solutions plus avancées.

Gestion de production : Un système MES (Manufacturing Execution System) adapté sera déployé pour assurer le suivi de la production et la traçabilité. Le choix se portera sur une solution éprouvée et dimensionnée aux besoins, permettant une évolution progressive des fonctionnalités.



Cette approche mesurée de l'innovation et de la digitalisation permettra de construire des bases solides tout en maîtrisant les investissements et les risques. Elle pourra évoluer progressivement vers des solutions plus avancées à mesure que l'entreprise se développera et que l'écosystème local d'innovation se renforcera. L'objectif est d'abord de maîtriser parfaitement les technologies existantes avant d'envisager des développements plus ambitieux.

5. Réglementation, durabilité et certifications

5.1. NORMES ET RÉGLEMENTATION NATIONALES

En Tunisie, la réglementation spécifique à la fabrication additive pour l'aéronautique n'existe pas. Cependant, le projet doit se conformer aux réglementations générales applicables au secteur industriel, notamment :

- Les conditions de travail et la sécurité dans un environnement industriel.
- La manipulation de matières dangereuses (poudres métalliques).
- L'utilisation d'équipements sous pression et de gaz industriels.
- **Le décret n° 2005-1991** relatif à l'étude d'impact sur l'environnement.
- **La loi n° 96-41** relative aux déchets et au contrôle de leur gestion.
- Les normes relatives aux émissions atmosphériques et à la qualité de l'air.
- Les autorisations d'exploitation délivrées par le ministère de l'Industrie.

5.2. NORMES ET RÉGLEMENTATION INTERNATIONALES

L'industrie aéronautique étant fortement réglementée au niveau international, le projet devra se conformer à un ensemble complet de normes et réglementations, particulièrement pour accéder aux marchés d'exportation.

Les principales normes spécifiques à la fabrication additive incluent :

- **ISO/ASTM 52900** : Définit la terminologie standard pour la fabrication additive.
- **ISO/ASTM 52901** : Spécifie les exigences d'achat des pièces fabriquées en FA.
- **ISO/ASTM 52904** : Définit les pratiques de qualification des installations FA.
- **ISO/ASTM 52907** : Spécifications techniques pour les poudres métalliques.

Les normes générales de l'industrie aéronautique à respecter comprennent :

- **EN 9100** : Système de management de la qualité pour l'aéronautique (version aéronautique de l'ISO 9001).
- **Nadcap (National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program)** : Certification spécifique pour les procédés spéciaux en aéronautique
- **AS9102** : Exigences pour la première inspection des articles (FAI - First Article Inspection).
- **EN 9145** : Advanced Product Quality Planning (APQP) et Process Product Approval Process (PPAP).

Les réglementations des autorités aéronautiques incluent :

■ **Pour le marché européen :**

- Règlement EASA Part 21G pour la production de pièces aéronautiques.
- Règlement EASA Part 145 pour la maintenance aéronautique.
- Directives REACH concernant les substances chimiques.

■ **Pour le marché américain :**

- Réglementation FAA concernant la production de pièces aéronautiques.
- Normes de certification des matériaux et procédés.

Les spécifications des donneurs d'ordre devront également être respectées telles que les :

- Spécifications Airbus (AIPS - Airbus Industrial Process Specification).
- Spécifications Boeing (BAC - Boeing Aircraft Company).
- Spécifications Safran.
- Spécifications General Electric Aviation.

- Cette conformité représente un investissement significatif en temps et en ressources, mais elle est indispensable pour opérer dans le secteur aéronautique. Un plan de déploiement progressif des certifications sera établi en fonction des priorités commerciales et des ressources disponibles.

5.3. CONSIDÉRATIONS ENVIRONNEMENTALES

La fabrication additive présente des avantages environnementaux intrinsèques par rapport aux méthodes traditionnelles de fabrication, notamment grâce à l'optimisation de l'utilisation des matières premières et la réduction des déchets. Néanmoins, le projet doit tenir compte de plusieurs enjeux environnementaux spécifiques.

La gestion des matières premières constitue un aspect environnemental majeur. Les poudres métalliques utilisées en fabrication additive nécessitent une gestion rigoureuse :

- Un système de filtration et de recyclage des poudres non fusionnées sera mis en place pour minimiser les déchets
- Un circuit de collecte et de traitement spécifique sera établi pour les poudres contaminées ou non réutilisables
- Le stockage et la manipulation des poudres seront réalisés dans des conditions strictement contrôlées pour éviter toute dispersion dans l'environnement

La maîtrise des émissions atmosphériques représente un second enjeu important. Le projet prévoit :



- L'installation de systèmes de filtration à haute efficacité sur les machines de fabrication additive.
- La mise en place d'une ventilation contrôlée dans les zones de manipulation des poudres.
- Un suivi régulier de la qualité de l'air dans les ateliers.
- Le traitement spécifique des rejets atmosphériques selon les normes en vigueur.

L'optimisation énergétique sera recherchée à travers :

- Le choix d'équipements de dernière génération à haute efficacité énergétique.
- L'optimisation des cycles de fabrication pour réduire la consommation d'énergie.
- La récupération de chaleur lorsque possible.
- Un système de monitoring énergétique pour identifier les sources d'économie potentielles.



Le projet intègre également une gestion responsable des déchets industriels :



- Tri sélectif des différents types de déchets.
- Valorisation des supports et des pièces non conformes par refusion.
- Traitement spécifique des consommables usagés (filtres, EPI, etc.).
- Documentation rigoureuse de la gestion des déchets conformément à la réglementation.

La consommation d'eau sera optimisée, particulièrement pour les opérations de nettoyage et de post-traitement :

- Installation d'un circuit fermé pour les eaux de refroidissement.
- Monitoring de la consommation d'eau pour détecter les dérives.



- Ces considérations environnementales seront intégrées dans un système de management environnemental structuré, avec pour objectif la certification ISO 14001 à moyen terme. Un programme de formation et de sensibilisation du personnel aux bonnes pratiques environnementales accompagnera ces mesures.

5.4. CERTIFICATIONS

L'activité de fabrication additive pour l'aéronautique nécessite l'obtention et le maintien d'un ensemble de certifications essentielles. Au-delà du respect des normes techniques présentées dans la section 5.2, qui constituent un prérequis fondamental, le projet devra obtenir des certifications systèmes démontrant sa capacité à produire de manière maîtrisée et conforme aux exigences du secteur aéronautique. Le projet adoptera une approche progressive dans leur mise en place, en commençant par les certifications indispensables avant d'étendre progressivement le périmètre des qualifications.

Les certifications prioritaires à obtenir dès le démarrage sont :

- **La certification EN 9100**, version aéronautique de l'ISO 9001, qui constitue le pré-requis fondamental pour opérer dans le secteur aéronautique.
- **La certification Nadcap (National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program)** pour les procédés spéciaux de fabrication additive, qui devient progressivement un standard dans l'industrie.



Dans un second temps, en fonction de l'évolution de l'activité, le projet visera :

- **La certification ISO 14001** pour le management environnemental, qui démontrera l'engagement du projet dans une démarche de développement durable.
- **La certification ISO 45001** pour la santé et la sécurité au travail pourra également être envisagée pour structurer la gestion des risques professionnels spécifiques à l'activité.



Au-delà de ces certifications, le projet devra obtenir progressivement des qualifications des donneurs d'ordre aéronautiques :

- Qualification des processus de fabrication
- Qualification des couples matériaux/procédés
- Qualification des personnels clés
- Validation des moyens de contrôle et d'essais

6. Analyse SWOT du projet

S

- Technologie de rupture adoptée relativement tôt en Tunisie, permettant de se positionner comme précurseur sur un marché local encore vierge.
- Process hautement digitalisé dès la conception, s'inscrivant naturellement dans l'industrie 4.0.
- Capacité à produire des pièces complexes impossibles à réaliser avec les méthodes traditionnelles.
- Structure de coûts compétitive grâce aux avantages de la Tunisie (main d'œuvre qualifiée notamment).
- Potentiel important de gains de performance pour les clients (réduction de poids, optimisation thermique, intégration de fonctions).
- Technologie permettant la production à la demande, réduisant les stocks et les délais.

FORCES**W**

- Investissement initial important avec un endettement conséquent.
- Dépendance totale vis-à-vis des fournisseurs étrangers pour les équipements et les matières premières critiques.
- Absence initiale de références dans un secteur où la confiance des donneurs d'ordre est cruciale.
- Processus long et coûteux de qualification des pièces et des procédés pour l'aéronautique.
- Capacités limitées en R&D et innovation du fait du contexte local et des ressources disponibles au démarrage.
- Besoin important en personnel hautement qualifié dans un marché du travail local limité pour ces compétences spécifiques.

FAIBLESSES

O

- Marché en forte croissance (+15% par an).
- Adoption croissante de la fabrication additive par les grands donneurs d'ordre aéronautiques.
- Présence d'un tissu industriel aéronautique établi en Tunisie (plus de 80 entreprises) offrant un marché local potentiel.
- Besoins croissants en pièces de rechange pour la maintenance aéronautique.
- Tendance forte vers l'allègement des structures et l'optimisation des performances dans l'aéronautique.
- Position géographique stratégique de la Tunisie pour servir l'Europe.

OPPORTUNITES

T

- Concurrence forte des acteurs établis dans les pays développés, bénéficiant d'une grande avance technologique.
- Évolution rapide des technologies pouvant rendre les équipements obsolètes.
- Risque de change important sur les approvisionnements en équipements et matières premières.
- Durcissement possible des exigences de certification et des normes environnementales.
- Dépendance forte vis-à-vis des stratégies d'approvisionnement des grands donneurs d'ordre.
- Instabilité potentielle des coûts des matières premières (poudres métalliques).

MENACES

7. Investissement et rentabilité prévisionnelle

7.1. BESOINS EN INVESTISSEMENT ET FINANCEMENT

Pour une capacité de production de 19 000 heures d'impression effective par an avec 6 machines de fabrication additive fonctionnant en 2x8, le projet nécessite un investissement initial de 30 millions DT, réparti comme suit:

Tableau 1 : Budget d'investissement en mDT

Rubrique	Investissement en mDT ¹
Terrain et construction	2 500
Agencement et installations industrielles	1 500
Équipements de fabrication additive et de post-traitement	19 000
Équipements de contrôle et laboratoire	3 000
Matériel de transport et de manutention	500
Matériel bureautique et informatique	1 000
Fonds de roulement de démarrage	2 500
Total	30 000

Le coût de cet investissement a été estimé sur la base des principaux postes suivants :

- L'acquisition d'un terrain industriel de 5 000 m² et la construction d'un atelier de production et d'un bâtiment administratif sur une superficie de 1500 m² ;
- Un investissement en agencement et installations industrielles pour un coût de 1500 mDT incluant un système de traitement d'air et ventilation ATEX, l'infrastructure de stockage et manutention sécurisée des poudres, les installations électriques spécifiques, le système de sécurité et protection incendie, etc.

¹ Il s'agit de montants estimatifs

- 6 machines fabrication additive pour un coût de 15 000 mDT : 4 machines LPBF pour pièces moyennes, 1 machine de WAAM pour grandes pièces et 1 machine SLS pour polymères techniques.
- Des équipements post-traitement pour un coût de 4 000 mDT, incluant notamment, un four de traitement thermique sous atmosphère contrôlée, un centre d'usinage 5 axes, une machine d'électroérosion à fil, et quelques équipements de sablage, nettoyage, etc
- Des équipements de contrôle essentiels d'un coût d'environ 3000 mDT, intégrant une machine de mesure tridimensionnelle, un scanner 3D optique, un équipement de contrôle par ultrasons, des équipements de laboratoire de base (préparation métallographique, dureté, microscope), ainsi que des équipements de métrologie conventionnelle.

➤ *Il y a lieu de signaler que ce coût d'investissement a été estimé en supposant que certaines opérations non critiques de post-traitement et de contrôle seront initialement sous-traitées telles que l'anodisation, le polissage robotisé, les essais mécaniques complexes, ...*

Le schéma de financement préconisé est le suivant :

Tableau 2 : Schéma de financement du plan d'investissement

Financement	Montant en 1000 DT
Capital	12 000
Crédit moyen terme	18 000
Total	30 000

Conformément à la loi n°2016-71 et ses textes d'application², le projet bénéficiera d'une prime de 15% du coût total de l'investissement, s'agissant d'un projet dans un secteur prioritaire utilisant des technologies avancées et contribuant au développement de la chaîne de valeur dans l'industrie aéronautique.

² Décret gouvernemental n° 2017-389 du 9 mars 2017 tel que complété et modifié par le Décret n° 2024-182 du 4 avril 2024

7.2. PRÉVISIONS D'ACTIVITÉ

Les prévisions de vente ont été établies sur la base des hypothèses suivantes :

- Capacité disponible par machine : 4 000 heures/an (250 jours × 16 heures en 2x8) ;
- Augmentation progressive du taux d'utilisation de la capacité disponible de 50% en 1^{ère} année à 80% en 4^{ème} année ;
- Prix horaires moyens par technologie (incluant la matière première) :
 - LPBF (4 machines) : 1 500 DT/heure ;
 - WAAM (1 machine) : 1 800 DT/heure ;
 - Polymères techniques (1 machine) : 700 DT/heure.
- CA services associés : autour de 10% du CA production ;
- Part à l'export : 90% du CA Total

Sur la base de ces hypothèses, les prévisions de vente et de CA sur les cinq premières années seraient comme suit :

Tableau 3 : Prévisions d'activité en mDT

Année	2025	2026	2027	2028	2029
Heures disponibles / machine FA (2x8)	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000
Taux d'utilisation des machines FA	50%	60%	70%	80%	80%
Heures effectives					
LPBF (4 machines)	6 400	8 000	9 600	11 200	12 800
WAAM (1 machine)	1 600	2 000	2 400	2 800	3 200
Polymères (1 machine)	1 600	2 000	2 400	2 800	3 200
CA Production en mDT	17 000	20 400	23 800	27 200	27 200
CA Services associés en mDT	1 700	2 040	2 380	2 720	2 720
CA Total en mDT	18 700	22 440	26 180	29 920	29 920
Dont CA Export (90%)	16 830	20 196	23 562	26 928	26 928

7.3. PRÉVISIONS DE CHARGE

Les prévisions de charge ont été estimées sur la base des hypothèses suivantes :

- Coût des matières premières et consommables (incluant les poudres métalliques très coûteuses) : 45% du CA Production ;
- Autres charges d'exploitation : 18% du CA (ce coût relativement élevé est expliqué par l'importance des coûts d'électricité, sous-traitance d'opérations de post-traitement, certifications, marketing, logistique, ...)
- Charges financières sur crédit d'investissement : Crédit à un taux d'intérêt de 11% à rembourser sur 7 ans dont 1 année de grâce ;
- Frais financiers de fonctionnement : 3% du CA ;
- Charges de personnel basées sur :
 - Une évolution progressive de l'effectif : de 50 personnes au cours de la 1ère année à 80 personnes en 4ème année ;
 - Un salaire mensuel moyen net de 2500 DT pour les cadres ; 1400 DT pour les techniciens et agents de maîtrise ; 900 DT pour l'exécution ;

Sur la base de ces hypothèses, les prévisions de charges pour les cinq premières années d'activité seraient comme suit :

Tableau 4 : Prévisions de charge en mDT

Année	2025	2026	2027	2028	2029
Achats	7 650	9 180	10 710	12 240	12 240
Personnel	1 476	1 772	2 067	2 362	2 362
Autres charges d'exploitation	3 366	4 039	4 712	5 386	5 386
Frais Financiers de Fonctionnement	561	673	785	898	898
Dotations aux amortissements	2 715	2 715	2 715	2 715	2 715
Frais financiers de financement	1 980	1 815	1 485	1 155	825
Total Charges	17 748	20 194	22 475	24 755	24 425

7.4. RENTABILITÉ

Sur la base des prévisions de ventes et de charges, le compte de résultat prévisionnel serait comme suit :

Tableau 5 : Compte de résultat prévisionnel (en mDT)

Année	2025	2026	2027	2028	2029
Chiffre d'affaires	18 700	22 440	26 180	29 920	29 920
Total Charges	17 748	20 194	22 475	24 755	24 425
Résultat avant impôts	952	2 246	3 705	5 165	5 495
Impôt sur les sociétés (15%)	143	337	556	775	824
Résultat Net	809	1 909	3 149	4 390	4 670

En fonction de ces projections, la rentabilité du projet pourrait être évaluée à travers les ratios du TRI et de la VAN comme suit :

Tableau 6 : Ratios de rentabilité du projet

Indicateur	Valeur
Taux de Rentabilité Interne (TRI)	21%
VAN (taux d'actualisation de 14%)	6 425 mDT
Retour sur investissement	5,2 ans

Avec un TRI de 21% et une VAN positive de 6 425 mDT à un taux d'actualisation de 14%, le projet démontre une rentabilité très acceptable. Le retour sur investissement prévu en 5,2 ans indique un équilibre satisfaisant entre le risque et la rentabilité.

7.5. GESTION DES RISQUES

La gestion des risques dans un projet de fabrication additive pour l'aéronautique nécessite une attention particulière compte tenu des exigences du secteur et de l'importance des investissements.

Tableau 7 : Risques financiers et opérationnels et mesures d'atténuation

Risque	Description	Mesures d'atténuation
Technologique	<ul style="list-style-type: none"> Évolution rapide des technologies pouvant rendre les équipements obsolètes Difficulté à maîtriser les processus complexes Problèmes de qualification des processus 	<ul style="list-style-type: none"> Choix de technologies matures et éprouvées (LPBF) Formation poussée des équipes Veille technologique active
Qualité	<ul style="list-style-type: none"> Non-conformités sur pièces aéronautiques Perte de qualification 	<ul style="list-style-type: none"> Système qualité rigoureux dès le démarrage Formation continue du personnel Double contrôle sur les pièces critiques Documentation exhaustive des processus
Approvisionnement	<ul style="list-style-type: none"> Dépendance vis-à-vis des fournisseurs de poudres Volatilité des prix des matières premières Délais d'approvisionnement longs 	<ul style="list-style-type: none"> Double sourcing pour les poudres critiques Stock de sécurité Contrats cadres avec les fournisseurs clés.
Commercial	<ul style="list-style-type: none"> Difficulté à pénétrer un marché dominé par des acteurs établis Dépendance vis-à-vis des donneurs d'ordre Cycles de qualification longs 	<ul style="list-style-type: none"> Stratégie prix compétitive Diversification progressive de la clientèle Focus initial sur pièces moins critiques
Financier	<ul style="list-style-type: none"> Besoin important en fonds de roulement Impact des variations de change sur les achats 	<ul style="list-style-type: none"> Dimensionnement adéquat du FDR initial Couverture naturelle par les exports
RH	<ul style="list-style-type: none"> Difficulté à recruter des profils spécialisés Turnover du personnel qualifié 	<ul style="list-style-type: none"> Partenariat avec écoles d'ingénieurs Politique de rétention attractive
Réglementaire	<ul style="list-style-type: none"> Évolution des normes aéronautiques Durcissement des exigences environnementales Nouvelles certifications requises 	<ul style="list-style-type: none"> Veille réglementaire active Relations étroites avec organismes de certification

8. Annexes

8.1. ADRESSES UTILES DE QUELQUES FOURNISSEURS D'ÉQUIPEMENTS

1. Machines de fabrication additive LPBF :

- **EOS GmbH (Allemagne)**
 - Modèles : EOS M400-4, EOS M300-4
 - www.eos.info
- **CONCEPT LASER GmbH (Groupe GE, Allemagne)**
 - Modèles : M2 Series 5, X LINE 2000R
 - www.concept-laser.de
- **SLM Solutions Group AG (Allemagne)**
 - Modèles : SLM@500, SLM@280
 - www.slm-solutions.com

2. Machines WAAM

- **MELTIO (Espagne)**
 - Modèle : Meltio Engine
 - www.meltio3d.com
- **GEFERTEC GmbH (Allemagne)**
 - Modèle : arc605
 - www.gefertec.de

3. Machines pour polymères techniques :

- **EOS GmbH (Allemagne)**
 - Modèle : EOS P396
 - www.eos.info
- **3D Systems (USA)**
 - Modèle : ProX SLS 6100
 - www.3dsystems.com

4. Fours de traitement thermique :

- **ECM Technologies (France)**
- www.ecm-furnaces.com
- **TAV VACUUM FURNACES (Italie)**
- www.tav-vacuumfurnaces.com

5. Équipements de contrôle dimensionnel :

- **ZEISS Industrial Quality Solutions (Allemagne)**
- www.zeiss.com/metrology
- **HEXAGON Manufacturing Intelligence**
- www.hexagonmi.com

6. Tomographie et contrôle non destructif :

- **NIKON Metrology (Japon/Europe)**
- Systèmes de tomographie industrielle
- www.nikonmetrology.com
- **YXLON International (Allemagne)**
- Systèmes de radiographie industrielle
- www.yxlon.com

8.2. ADRESSES UTILES DE QUELQUES FOURNISSEURS D'INTRANTS

1. Poudres métalliques pour LPBF

- **Carpenter Additive (UK)**
- Poudres de titane, aluminium, nickel
- www.carpenteradditive.com
- **Höganäs AB (Suède)**
- Gamme complète de poudres métalliques
- www.hoganas.com
- **Oerlikon AM (Allemagne)**
- Poudres qualifiées aéronautique
- www.oerlikon.com/am

- **AP&C (Groupe GE, Canada)**
 - Spécialiste des poudres de titane
 - www.advancedpowders.com

2. Matériaux pour WAAM :

- **BÖHLER Edelstahl (Autriche)**
 - Fils métalliques spéciaux
 - www.bohler-edelstahl.com
- **Lincoln Electric (USA)**
 - Fils pour fabrication additive
 - www.lincolnelectric.com

3. Poudres polymères techniques :

- **EOS GmbH (Allemagne)**
 - Gamme PA, PEEK, PEKK
 - www.eos.info
- **Arkema (France)**
 - Poudres polyamides techniques
 - www.arkema.com
- **Evonik (Allemagne)**
 - Polyamides haute performance
 - www.evonik.com

8.3. PROJECTIONS DE RENTABILITÉ

		2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Heures disponibles / machine FA		4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000	4 000
Taux d'utilisation des machines FA		50%	60%	70%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%
Heures effectives	LPBF (4 machines)	8 000	9 600	11 200	12 800	12 800	12 800	12 800	12 800	12 800	12 800
	WAAM (1 machine)	2 000	2 400	2 800	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200
	Polymères (1 machine)	2 000	2 400	2 800	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200	3 200
Prix moyens en DT / heure (matières incluses)	LPBF (4 machines)	1 500									
	WAAM (1 machine)	1 800									
	Polymères (1 machine)	700									
CA Production en mDT	LPBF (4 machines)	12 000	14 400	16 800	19 200	19 200	19 200	19 200	19 200	19 200	19 200
	WAAM (1 machine)	3 600	4 320	5 040	5 760	5 760	5 760	5 760	5 760	5 760	5 760
	Polymères (1 machine)	1 400	1 680	1 960	2 240	2 240	2 240	2 240	2 240	2 240	2 240
	Total	17 000	20 400	23 800	27 200						
CA Services	<i>10% du CA Production</i>	1 700	2 040	2 380	2 720	2 720	2 720	2 720	2 720	2 720	2 720
CA Total		18 700	22 440	26 180	29 920						
<i>Dont CA Export (90%)</i>		16 830	20 196	23 562	26 928	26 928	26 928	26 928	26 928	26 928	26 928

2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Charges en mDT		2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Achats		7 650	9 180	10 710	12 240	12 240	12 240	12 240	12 240	12 240	12 240
Personnel		1 476	1 772	2 067	2 362	2 362	2 362	2 362	2 362	2 362	2 362
Autres charges d'exploitation		3 366	4 039	4 712	5 386	5 386	5 386	5 386	5 386	5 386	5 386
Frais financiers de fonctionnem		561	673	785	898	898	898	898	898	898	898
Dotations aux amortissements		2 715	2 715	2 715	2 715	2 715	2 415	2 415	2 415	2 415	2 415
Frais financiers de financement		1 980	1 815	1 485	1 155	825	495	165	0	0	0
Total charges		17 748	20 194	22 475	24 755	24 425	23 795	23 465	23 300	23 300	23 300

Rsultat avant impôts	952	2 246	3 705	5 165	5 495	6 125	6 455	6 620	6 620	6 620
Impôts	143	337	556	775	824	919	968	993	993	993
Résultat Net en mDT	809	1 909	3 149	4 390	4 670	5 206	5 486	5 627	5 627	5 627

Cash Flow	3 524	4 624	5 864	7 105	7 385	7 621	7 901	8 042	8 042	8 042
Cash Flow - Investissement	-26 476	4 624	5 864	7 105	7 385	7 621	7 901	8 042	8 042	8 042

TRI	21%
VAN (14%) en mDT	6 425

2025

AGENCE DE PROMOTION DE L'INDUSTRIE ET DE L'INNOVATION



Agence de Promotion
de l'Industrie et de l'Innovation

63, Rue de Syrie, 1002 Tunis Belvédère - Tunisie

Tél.: (216) 70 162 888 - Fax: (216) 71 782 482

E-mail : apii@apii.tn