

People's Democratic Republic of Algeria

Ministry of Higher Education and Scientific Research

Mohamed Boudiaf University of M'sila

Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة المسيلة

كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Présenté par :

GHADBANE Yassine & KOUIDRI Rami

Thème

RECONSTRUCTION NUMERIQUE ET FABRICATION D'UN COMPOSANT INDUSTRIEL COMPLEXE PAR NUMERISATION 3D

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
ELHADI Abdelmalek	Pr	Président
SLAMANI Mohamed	Pr	Examineur
ARSLANE Mustapha	MCB	Encadrant
BIDI Tarek	Ingénieur	Co Encadrant

Année Universitaire : 2025 / 2026

DÉDICACE

NOUS DÉDIONS CE MODESTE TRAVAIL, FRUIT DE PLUSIEURS ANNÉES D'EFFORTS ET
DE PERSÉVÉRANCE,

À NOS TRÈS CHERS PARENTS,
QUI ONT TOUJOURS ÉTÉ NOTRE SOURCE DE FORCE ET DE MOTIVATION.
À VOUS QUI N'AVEZ JAMAIS CESSÉ DE CROIRE EN NOUS,
POUR VOS SACRIFICES INESTIMABLES, VOTRE AMOUR INFINI, VOS
ENCOURAGEMENTS CONSTANTS ET VOS PRIÈRES QUI NOUS ONT ACCOMPAGNÉS À
CHAQUE ÉTAPE DE NOTRE PARCOURS.
AUCUN MOT NE SAURAIT EXPRIMER TOUTE LA RECONNAISSANCE, LE RESPECT ET
L'AMOUR QUE NOUS VOUS PORTONS.

À NOS FRÈRES ET SŒURS,
POUR LEUR PRÉSENCE INDÉFECTIBLE, LEUR SOUTIEN MORAL, LEUR PATIENCE ET
LEURS ENCOURAGEMENTS QUI NOUS ONT DONNÉ LA FORCE D'AVANCER ET DE NE
JAMAIS ABANDONNER.
VOUS AVEZ TOUJOURS ÉTÉ À NOS CÔTÉS DANS LES MOMENTS DE DOUTE COMME
DANS LES MOMENTS DE RÉUSSITE.

À NOS CHERS COLLÈGUES ET AMIS,
AVEC QUI NOUS AVONS PARTAGÉ DES MOMENTS INOUBLIABLES DURANT NOTRE
PARCOURS UNIVERSITAIRE.
MERCI POUR VOTRE ENTRAIDE, VOTRE ESPRIT DE SOLIDARITÉ, VOS CONSEILS ET
VOTRE BONNE HUMEUR QUI ONT RENDU CE CHEMIN PLUS AGRÉABLE ET
ENRICHISSANT.

À TOUTES LES PERSONNES QUI NOUS SONT CHÈRES,
QUI, DE PRÈS OU DE LOIN, ONT CONTRIBUÉ À NOTRE RÉUSSITE, PAR UN MOT, UN
GESTE OU UN ENCOURAGEMENT.

QUE CE TRAVAIL SOIT LE TÉMOIGNAGE DE NOTRE PROFONDE GRATITUDE ET DE
NOTRE SINCÈRE RECONNAISSANCE ENVERS VOUS TOUS.

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu le Tout-Puissant de nous avoir accordé la force, le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur, le **Dr Mustapha ARSLANE**, pour son accompagnement constant, sa disponibilité, ses conseils avisés et la qualité de son encadrement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons également nos vifs remerciements aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce travail, ainsi que pour leurs remarques pertinentes et leurs critiques constructives.

Nous exprimons également notre reconnaissance à l'ensemble de nos enseignants pour la qualité de la formation qu'ils nous ont dispensée, ainsi que pour leur encadrement pédagogique et leur engagement tout au long de notre parcours universitaire.

Nous tenons à remercier vivement l'entreprise **SAIEG** pour son accueil, sa collaboration et les moyens mis à notre disposition durant notre stage, qui ont contribué à la réalisation de ce travail dans de bonnes conditions.

Nous adressons un remerciement particulier à nos maîtres de stage, Monsieur **Hamza OUAKAL**, **Said ALLAL** et monsieur **Tarek BIDI**, pour leur accompagnement, leur disponibilité, leurs conseils précieux et leur soutien durant toute la période de stage.

Nous adressons également nos remerciements à tout le personnel technique et administratif ayant participé, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce mémoire.

À toutes les personnes ayant contribué à la réalisation de ce travail, nous adressons nos remerciements les plus sincères.

Sommaire

Sommaire	01
Abréviations	03
Liste des figures	04
Liste des tableaux	07
Introduction générale.....	08

Chapitre 1 : L'état de l'art et les fondements théoriques

1.1. Rétroconception : principes et étapes	11
1.1.1. Introduction	11
1.1.2. Historique	11
1.1.3. Définition.....	12
1.1.4. Le principe de la rétroconception 3D	13
1.1.5. Outils de rétroconception.....	15
1.2. Technologies de numérisation 3D	17
1.2.1. Définition.....	17
1.2.2. Formats de données	18
1.2.3. Limites et sources d'erreurs.....	20
1.3. Les superalliages de nickel	22
1.3.1. Les différents types des superalliages à base de nickel	24
1.4. Techniques de fabrication adaptées aux pièces complexes.....	25
1.4.1. Usinage CNC	25
1.4.2. Programmation CNC..	31
1.4.3. Impression 3D métal (SLM/DED)..	32
1.4.4. Moulage sous pression.....	34
1.4.5. Critères de choix du procédé et du matériau	38

Chapitre 2 : La rétroconception de la pièce étudiée

2.1. Présentation et choix de la pièce complexe.....	42
2.1.1. Description géométrique et fonctionnelle.....	42
2.1.2. Contraintes d'utilisation : charges, vibrations, thermique	43
2.2. Numérisation 3D	44
2.2.1. Préparation de la pièce.....	44
2.2.2. Acquisition (scanner 3D).....	45
2.2.3. Traitement du nuage de points.....	47
2.3. Reconstruction CAO	49
2.3.1. Organisation des surfaces / volumes	49
2.3.2. Génération du modèle paramétrique.....	50

2.3.3. Validation par superposition avec la pièce réelle	51
2.4. Analyse des défauts	53
2.4.1. Zones critiques : concentrations de contraintes, variations d'épaisseurs	53
2.4.2. Limitations géométriques identifiées.....	54
2.5. Conclusion.....	54
Chapitre 3 : Partie expérimentale (Fabrication d'ailette de turbine)	
3.1. Choix du procédé de fabrication	56
3.1.1. Impression 3D.....	56
3.1.2. Équipements utilisés	57
3.1.3. Processus de travail (étapes de rétroconception).....	59
3.2. Fabrication du prototype	68
3.2.1. Étapes d'usinage ou impression	68
3.2.2. Résultats et discussion	71
3.3. Conclusion.....	74
Conclusion générale	76
Annexe	78
Références bibliographiques	82
Résumé	84

Abréviations

CAO (CAD) : Conception Assistée par Ordinateur

FAO (CAM) : Fabrication Assistée par Ordinateur

CNC : Computer Numerical Control

SLM : Selective Laser Melting

DED : Directed Energy Deposition

STL : Standard Triangle Language

CAD : Computer Aided Design

CAM : Computer Aided Manufacturing

MMT : Machine à Mesurer Tridimensionnelle

RPM : Rotation Par Minute

G-Code : Code de programmation des machines CNC

SLS : Selective Laser Sintering

FDM : Fused Deposition Modeling

Geomagic X : Logiciel de rétroconception et d'inspection 3D

Revopoint MIRACO : Scanner 3D portable

Scan 3D : Numérisation tridimensionnelle

Nuage de points : Ensemble de points représentant la géométrie d'un objet

DAO : Dessin Assisté par Ordinateur

IA : Intelligence Artificielle

Liste des figures

CHAPITRE 1

Figure 1.1 : Le principe de la rétroconception 3D	13
Figure 1.2 : Processus de rétroconception mécanique d'un bouchon	14
Figure 1.3 : Outils de rétroconception	16
Figure 1.4 : Nuages de points.....	19
Figure 1.5 : Modèle maillé.....	20
Figure 1.6 : Principe numérisation 3D	21
Figure 1.7 : Représentation schématique des principales phases dans les superalliages à base Ni	22
Figure 1.8 : Les vues en 2D et 3D de la structure cristalline	23
Figure 1.9 : Centre d'usinage CNC industriel.....	26
Figure 1.10 : Chaîne de fabrication CAO/FAO et usinage CNC	27
Figure 1.11 : Opération de fraisage CNC	28
Figure 1.12 : Tour à commande numérique (CNC)	28
Figure 1.13 : Opération de rectification CNC	29
Figure 1.14 :Machine EDM	30
Figure 1.15 : Opération de perçage par Laser	30
Figure 1.16 : Principe de l'impression 3D métal par fusion sélective au laser (SLM)	32
Figure 1.17 : Diagramme radar des caractéristiques de la fabrication additive	33
Figure 1.18 : Moulage sous pression.....	34
Figure 1.19 : Critères de choix du procédé et du matériau	39

CHAPITRE 2

Figure 2.1 : Ailette de turbine	42
Figure 2.2 : Ailette endommagée	43
Figure 2.3 : Distribution des contraintes (Von Mises) dans l'ailette de turbine	44

Figure 2.4 : Acquisition des données géométriques par scanner 3D portable	46
Figure 2.5 : Ailette de turbine capturée par le système d'acquisition	47
Figure 2.6 : Nuage de points représentant une ailette de turbine	47
Figure 2.7 : Nuage de points et analyse des déviations géométriques de la pièce numérisée	48
Figure 2.8 : Surface Reconstruction.....	50
Figure 2.9 : Conception paramétrique de structures dans SolidWorks.....	51
Figure 2.10 : Contrôle des écarts dimensionnels après superposition du modèle réel et du modèle numérique	52

CHAPITRE 3

Figure 3.1 : Imprimante 3D.....	56
Figure 3.2 : La pièce à étudier (ailette turbine mobile).....	57
Figure 3.3 : Scanner Revopoint MIRACO.....	58
Figure 3.4 : Processus de travail	60
Figure 3.5 : Préparation de l’endroit et de la pièce	60
Figure 3.6 : La numérisation	61
Figure 3.7 : Organigramme de la méthodologie suivie.....	62
Figure 3.8 : Formation de nuages de points	63
Figure 3.9 : Organigramme explicatif de la méthodologie de travail par GEOMAGIC.....	64
Figure 3.10 : Importation du nuage de points format STL dans Geomagic Design X	65
Figure 3.11 : Traitement du scan	66
Figure 3.12 : Extraire les régions	66
Figure 3.13 : La pièce restaurée	67
Figure 3.14 : Modèle CAO dans SolidWorks	67
Figure 3.15 : Résultat de contrôle dans GEOMAGIC X	68
Figure 3.16 : Impression 3D de pièce	69
Figure 3.17 : la pièce finie obtenue après fabrication par rapport à la pièce endommagée	70
Figure 3.18 : Résultats du contrôle métrologique de l’ailette de turbine après rétroconception et reconstruction numérique.....	71

Liste des tableaux

CHAPITRE 1

Tableau 1.1 : Rôle des principaux éléments d'addition dans les superalliages à base Ni (*) La

formation de carbures au sein de ces matériaux est complexe tant en nature, forme taille
et localisation (inter-intragranulaire) 24

Introduction générale

L'évolution rapide des technologies industrielles et l'augmentation de la complexité des composants mécaniques imposent aux entreprises de nouvelles exigences en matière de conception, de fabrication et de maintenance. Dans ce contexte, la maîtrise des outils numériques devient un enjeu majeur pour garantir la compétitivité, la qualité des produits et la réduction des délais de développement.

Les progrès réalisés dans le domaine de la métrologie tridimensionnelle ont considérablement transformé les méthodes d'acquisition des données géométriques. Grâce aux technologies de numérisation 3D, il est désormais possible de capturer avec une grande précision la géométrie de pièces mécaniques complexes, tout en réduisant le temps nécessaire aux opérations de mesure et de contrôle. Associées à des logiciels performants de traitement des nuages de points et de modélisation assistée par ordinateur, ces technologies ouvrent la voie à la reconstruction numérique fidèle de composants existants.

Dans ce cadre, la rétroconception (Reverse Engineering) s'est imposée comme une approche incontournable dans de nombreux secteurs industriels tels que l'aéronautique, l'automobile, l'énergie ou encore la maintenance industrielle. Elle permet non seulement de reproduire des pièces dont les plans d'origine sont indisponibles ou obsolètes, mais également d'analyser leur conception, d'évaluer leurs performances et de proposer des améliorations répondant aux exigences technologiques actuelles.

Par ailleurs, la simple reconstruction géométrique d'un composant ne suffit plus à satisfaire les besoins de l'industrie moderne. Les entreprises recherchent désormais des solutions permettant d'optimiser les performances mécaniques, de réduire la masse des structures, d'améliorer leur durée de vie et de maîtriser les coûts de fabrication. L'intégration des outils de simulation numérique et des procédés de fabrication avancés constitue ainsi une étape essentielle dans le cycle de développement des produits.

L'émergence de technologies telles que l'usinage à commande numérique (CNC) et la fabrication additive offre aujourd'hui des possibilités considérables pour la production rapide et précise de pièces complexes. Ces procédés permettent de concrétiser les modèles numériques issus de la rétroconception et de valider expérimentalement les solutions développées.

C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent travail intitulé « Rétroconception intelligente et fabrication optimisée de composants industriels ». L'objectif principal consiste à développer une démarche complète permettant la reconstruction numérique d'une pièce mécanique complexe, son analyse géométrique et sa fabrication à partir des technologies modernes de numérisation et de production.

Pour atteindre cet objectif, une ailette de turbine a été choisie comme cas d'étude. La méthodologie adoptée repose sur la numérisation tridimensionnelle de la pièce, le traitement des données acquises, la reconstruction d'un modèle CAO paramétrique ainsi que la fabrication d'un prototype destiné à valider la démarche proposée.

Le mémoire est structuré en trois chapitres. Le premier présente l'état de l'art relatif à la rétroconception, aux technologies de numérisation 3D et aux procédés de fabrication adaptés aux pièces complexes. Le deuxième chapitre est consacré à la rétroconception de l'ailette de turbine, depuis l'acquisition des données jusqu'à la reconstruction du modèle numérique. Enfin, le troisième chapitre décrit la phase expérimentale de fabrication et l'analyse des résultats obtenus.

Chapitre 1

État de l'art et Fondements Théoriques

1.1 Rétroconception : principes et étapes

1.1.1. Introduction

La rétroconception ou ingénierie inverse, consiste à déterminer les spécifications d'un produit ou d'un système en étudiant ses caractéristiques actuelles. Il est souvent utilisé pour améliorer les produits existants, corriger les erreurs ou adapter le produit aux nouvelles exigences du marché.

Dans les domaines de l'ingénierie mécanique et de la fabrication industrielle, l'ingénierie inverse fait référence à la méthode de création de données de conception et de documentation d'ingénierie à partir de pièces existantes et de leurs assemblages. Alors que dans le processus d'ingénierie conventionnel, les concepts et modèles d'ingénierie sont transformés en pièces réelles. Dans l'approche d'ingénierie inverse, les pièces réelles sont transformées en modèles et concepts d'ingénierie. De plus, grâce à l'application de techniques de la rétro-ingénierie, une pièce existante est recrée en acquérant ses données de surface ou de caractéristiques géométriques à l'aide d'appareils de numérisation ou de mesure avec ou sans contact.

La rétro-ingénierie a été utilisée pour produire de nombreuses pièces mécaniques, telles que des joints, des joints toriques, des boulons et des écrous, des joints et des pièces de moteur, et est largement utilisée dans de nombreuses industries. [1]

1.1.2. Historique :

L'histoire de la rétroconception trouve ses origines dans les années 1960 et 1970, où les premières démarches ont émergé pour améliorer la production de produits existants. À cette époque, le processus était essentiellement manuel et appliqué à des produits industriels tels que les machines et équipements. Rapidement, son potentiel a été reconnu dans des secteurs exigeants comme l'automobile et l'aéronautique.

Dans les années 1980, l'arrivée des scanners laser a marqué une rupture technologique majeure. Ces appareils ont permis pour la première fois de capturer la géométrie d'un objet physique sous forme de nuage de points avec une précision et une rapidité inédites, ouvrant la voie à une numérisation 3D fiable.

Les années 1990 ont vu l'essor des logiciels de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Des programmes comme CATIA, SolidWorks ou plus tard Geomagic ont intégré des modules

dédiés au traitement des nuages de points et à la reconstruction de surfaces. La rétroconception est ainsi devenue un processus numérique capable de générer des modèles paramétriques exploitables pour la simulation et la modification.

Au cours des années 2000, la fabrication additive (impression 3D) a révolutionné la chaîne de valeur. Couplée à la rétroconception, elle a permis de reproduire ou d'optimiser des pièces complexes sans outillage spécifique, réduisant considérablement les délais et les coûts de prototypage.

Avec l'avènement des technologies numériques, la rétroconception n'a cessé de gagner en précision, en rapidité et en accessibilité. Les entreprises utilisent désormais des outils intégrés de CAO, de simulation et de fabrication pour collecter, stocker et réutiliser les données de produits existants. Cette évolution leur permet de créer de nouveaux produits plus rapidement, à moindre coût et avec une meilleure qualité.

En somme, la rétroconception est devenue une technique incontournable dans de nombreuses industries. Elle est aujourd'hui considérée comme un levier efficace et rentable pour innover, améliorer les produits existants, les adapter à de nouveaux marchés ou encore prolonger la durée de vie de systèmes obsolètes.

1.1.3. Définition

La rétroconception désigne le processus de décomposition d'un produit existant pour en déterminer les spécifications et les dessins nécessaires pour le reproduire ou le modifier. C'est un processus inverse à la conception, où l'on part d'un produit existant pour en déduire les informations nécessaires pour sa création ou amélioration. Il peut s'agir de produits industriels, de machines, de bâtiments, d'installations, etc. La rétroconception est utilisée pour reproduire des produits obsolètes, pour améliorer des produits existants ou pour récupérer des informations pour une utilisation ultérieure. [1]

La rétroconception consiste en la reconstruction d'un modèle de conception basé sur un produit réel. Dans le domaine de la conception mécanique, la rétro conception fait partie d'un processus global débutant par la numérisation de la pièce d'étude, ce qui termine à la génération d'un nuage de points. Les domaines d'application de la rétro conception peuvent être très divers. En effet, la rétro conception concerne le prototypage virtuel, la métrologie, la sauvegarde du patrimoine industriel ou des besoins industriels. Ces domaines font appel à la rétro conception pour des raisons industrielles différentes. [2]

1.1.4 Le principe de la rétroconception 3D

Le processus de rétroconception 3D repose sur l'utilisation d'un scanner 3D pour capturer les formes d'un objet physique et ensuite, par le biais de logiciels de modélisation, reconstruire un modèle numérique détaillé. Voici les principales étapes du processus [2]

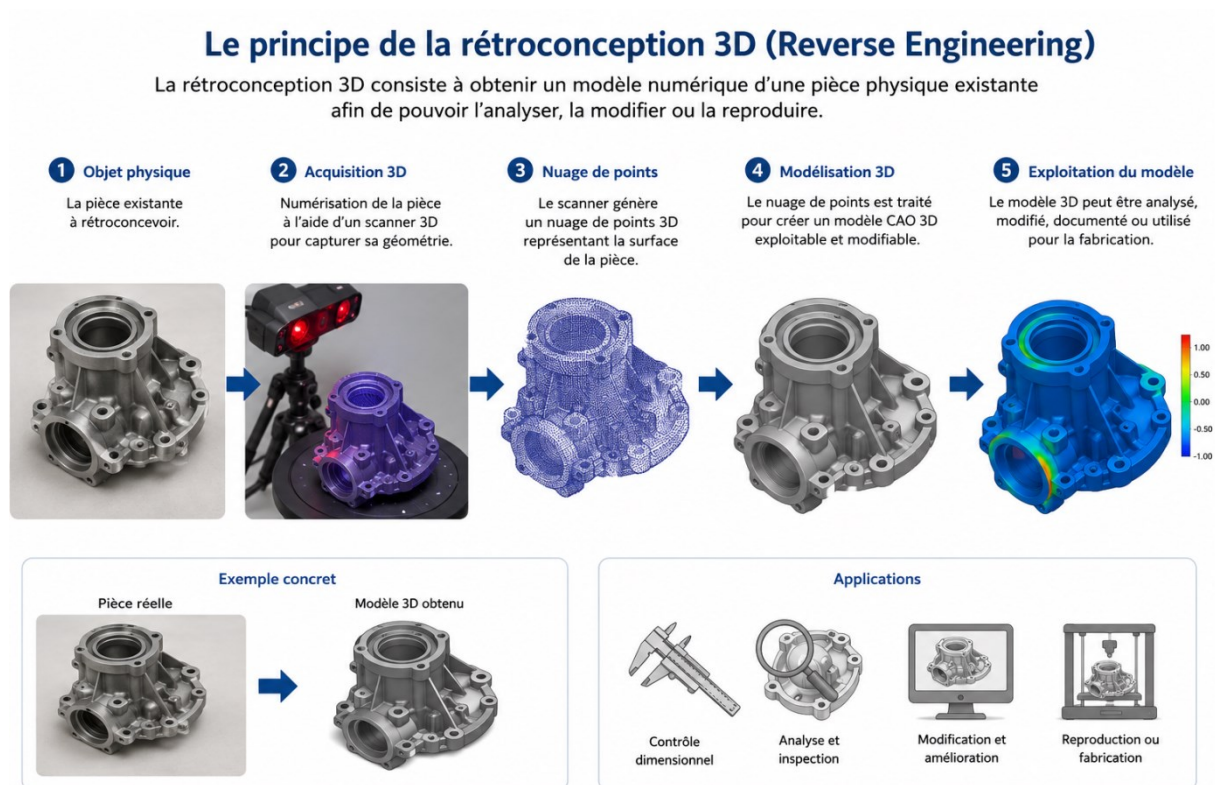


Figure 1.1 : Le principe de la rétroconception 3D [2]

1. Numérisation de l'objet physique

La première étape de la rétroconception consiste à numériser l'objet avec un scanner 3D (par exemple, un scanner laser, un scanner à lumière structurée ou un scanner à contact). Cette numérisation produit un nuage de points ou un maillage 3D qui représente la surface de l'objet scanné. Ces données décrivent la forme géométrique de l'objet avec une grande précision.

2. Traitement et nettoyage des données

Les données capturées lors de la numérisation sont souvent brutes et nécessitent un traitement pour être utilisables. Le nuage de points doit être nettoyé pour supprimer les bruits et les anomalies, et les différentes vues capturées doivent être alignées et fusionnées pour obtenir une représentation cohérente et complète de l'objet.

3. Modélisation CAO

Une fois que le modèle brut (souvent un maillage 3D) est prêt, il est importé dans un logiciel de modélisation assistée par ordinateur (CAO) tel que SolidWorks, CATIA ou Fusion 360. À ce stade, le modèle peut être retravaillé pour le transformer en un modèle paramétrique ou solide, c'est-à-dire un modèle qui peut être édité, analysé et modifié à volonté.

Cela permet de recréer les caractéristiques géométriques de l'objet, qu'il s'agisse de surfaces, de courbes ou d'autres détails complexes.

4. Analyse et optimisation

Une fois le modèle CAO généré, il peut être utilisé pour divers objectifs : analyse de la conception, optimisation structurelle, simulation mécanique, etc. Ce modèle peut aussi servir à améliorer la pièce en apportant des modifications ou des améliorations basées sur les performances observées.

5. Fabrication ou reproduction

Une fois le modèle optimisé, il peut être utilisé pour produire une nouvelle version de l'objet via des techniques telles que la fabrication additive (impression 3D) ou des méthodes de fabrication traditionnelles (usinage, moulage, etc.).



Figure 1.2 : Processus de Rétro-conception mécanique d'un bouchon

1.1.5 Outils de rétroconception

1. Matériel d'acquisition (Le Scan)

L'étape initiale consiste à capturer la géométrie de l'objet par :

- **Scanners Laser** : Projettent une ligne ou un faisceau laser pour mesurer les distances. Très précis pour les grandes structures.
- **Scanners à Lumière Structurée** : Projettent des motifs lumineux (franges). Ils sont extrêmement rapides et idéaux pour les pièces mécaniques complexes avec une haute résolution. [3]
- **MMT (Machines à Mesurer Tridimensionnelles)** : Utilisent des palpeurs physiques pour toucher des points précis. C'est la méthode la plus précise pour le contrôle dimensionnel et les tolérances.
- **Photogrammétrie** : Utilise des photos haute résolution prises sous différents angles pour reconstruire un modèle 3D via des algorithmes de corrélation d'images.

2. Logiciels de traitement de nuages de points

Une fois le scan est terminé, on obtient un "nuage de points" ou un maillage (souvent au format. STL). Il faut alors transformer ces données "mortes" en modèles CAO exploitables. Cette étape est généralement réalisée à l'aide de logiciels spécialisés de rétroconception (reverse engineering), tels que Geomagic Design X, PolyWorks, GOM Inspect ou encore CATIA, qui permettent de reconstruire des surfaces et des modèles paramétriques à partir des données numérisées [3]

3. Logiciels CAO avec modules de rétroconception

Afin de transformer les nuages de points ou les maillages issus de la numérisation 3D en modèles CAO exploitables, plusieurs logiciels de conception assistée par ordinateur intègrent aujourd'hui des modules spécialisés de rétroconception. Ces outils permettent la reconstruction de surfaces, la création de modèles paramétriques et la préparation des géométries pour la fabrication ou la simulation numérique (Fig. .1.3).

- SolidWorks (ScanTo3D) : permet d'importer des nuages de points et des maillages, puis de générer des surfaces et des modèles solides à partir des données numérisées.
- Autodesk Fusion 360 : propose des outils de traitement des maillages (« Mesh Workspace ») permettant de convertir des fichiers STL en corps solides ou en surfaces exploitables pour la conception.
- CATIA : dispose de modules avancés de rétroconception et de reconstruction surfacique, particulièrement adaptés à la création de surfaces complexes de haute qualité (surfaçage de classe A) dans les secteurs automobile et aéronautique [3].
- ANSYS SpaceClaim : offre des fonctionnalités performantes pour le nettoyage, la réparation et la simplification des géométries scannées avant leur utilisation dans des analyses par éléments finis (FEA) ou en mécanique des fluides numérique (CFD).

Catégorie	Outil / Logiciel	Description	Exemple (شفرة توربين)	Utilisation principale
 Acquisition 3D (Scanners)	Scanner 3D à lumière structurée <i>Exemples : Artec Eva, EinScan HX</i>	Projette un motif lumineux sur la pièce et capture sa déformation pour reconstruire la géométrie en 3D.	 شفرة توربين حقيقية → مسح ضوئي → سحابة نقاط	Pièces de petite à moyenne taille, haute précision, atelier ou laboratoire.
	Scanner 3D laser <i>Exemples : Faro Focus, Leica ScanStation</i>	Utilise un faisceau laser pour mesurer des millions de points avec une grande portée et précision.	 شفرة توربين حقيقية → مسح ليزري → سحابة نقاط	Pièces de grande taille, environnements industriels, relevés sur site.
	Scanner 3D portable (laser / lumière bleue) <i>Exemples : Creaform HandySCAN 3D, Shining 3D FreeScan</i>	Scanners portables offrant une grande flexibilité pour la numérisation de pièces de formes complexes.	 شفرة توربين حقيقية → مسح محمول → سحابة نقاط	Pièces complexes, contrôle qualité, rétroconception filaire.
 Traitement des données (Logiciels de traitement)	Geomagic Design X <i>Exemples : Geomagic Wrap, Geomagic Design X, PolyWorks</i>	Traitement du nuage de points : nettoyage, alignement, maillage (STL) et reconstruction de surfaces.	 سحابة نقاط → تنظيف/محاذاة → شبكة (Mesh)	Transformer les données brutes en maillage ou surfaces prêtes à être modélisées.
	PolyWorks	Logiciel d'inspection et de rétroconception permettant d'analyser et de comparer le modèle avec la pièce originale.	 شبكة (Mesh) → مقارنة CAO / pièce → تحليل الفجوات → خريطة الفجوات	Inspection dimensionnelle, analyse des écarts, contrôle qualité.
 Modélisation CAO	SolidWorks, CATIA, Siemens NX, Autodesk Inventor	Reconstruction du modèle CAO paramétrique à partir du maillage ou des surfaces.	 سحابة نقاط → نموذج بنائها → نموذج CAO نهائي	Création d'un modèle 3D modifiable et exploitable pour l'analyse, la modification ou la fabrication.
 Chaîne de rétroconception (مثال : شفرة توربين) 1. Pièce physique → 2. Acquisition 3D → 3. Nuage de points → 4. Traitement des données → 5. Modèle 3D (CAO) → 6. Exploitation 				

Figure 1.3 : Outils de rétroconception

1.2 Technologies de numérisation 3D

1.2.1 définition

La numérisation 3D est une technologie en pleine expansion qui permet de capturer la forme et les détails d'objets physiques en créant des modèles tridimensionnels numériques. Elle trouve des applications dans des domaines variés tels que l'ingénierie, la médecine, l'architecture, le patrimoine culturel, et bien d'autres. Mais comment fonctionne cette technologie et pourquoi est-elle si importante ? Cet article explore les principes de la numérisation 3D, ses principales applications et ses perspectives futures.

La numérisation 3D est le processus par lequel un objet physique est reproduit sous forme numérique en trois dimensions (3D). Cela permet de créer des représentations numériques précises, qui peuvent ensuite être utilisées pour diverses applications, que ce soit pour la visualisation, la modification, la simulation ou la fabrication. [4]

Les systèmes de numérisation 3D fonctionnent principalement en capturant des données sur la forme et parfois la texture de l'objet. Cela peut se faire à l'aide de différentes techniques telles que les scanners laser, les scanners à lumière structurée, ou encore la photogrammétrie (une technique qui utilise plusieurs photos d'un objet prises sous différents angles pour en créer un modèle 3D).

Les méthodes de numérisation 3D

Il existe plusieurs méthodes de numérisation 3D, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients en fonction des besoins spécifiques du projet :

Scanner laser 3D : Un faisceau laser est projeté sur la surface de l'objet, et les capteurs mesurent les distances entre le scanner et l'objet pour créer un nuage de points représentant la géométrie de l'objet. C'est une méthode extrêmement précise, largement utilisée pour des objets de grande taille ou complexes. [4]

Photogrammétrie : Cette technique consiste à prendre une série de photos d'un objet sous différents angles, puis à utiliser un logiciel pour assembler les images en un modèle 3D. Bien que moins précise que les scanners laser, la photogrammétrie est souvent utilisée pour des

applications plus accessibles, comme la numérisation d'objets pour des musées ou la création de modèles dans les jeux vidéo.

Applications de la numérisation 3D en domaine mécanique

La numérisation 3D est utilisée dans une multitude de secteurs, et ses applications continuent de se développer à mesure que la technologie progresse.

Ingénierie et industrie :

Rétroconception (Reverse Engineering) : Les entreprises utilisent la numérisation 3D pour reproduire des pièces mécaniques ou des composants existants. Cela est particulièrement utile lorsque les plans originaux ont été perdus ou si des modifications sont nécessaires pour améliorer un design.

Contrôle de qualité : En numérisant des pièces à la sortie d'une chaîne de production, il est possible de vérifier qu'elles répondent aux spécifications de conception initiales, assurant ainsi un contrôle qualité rigoureux.

1.2.2 formats de données

Dans cette première section, nous détaillons les différentes représentations tridimensionnelles utilisées en numérisation 3D. Nous distinguons trois familles principales de représentation : les nuages de points, les modèles maillés.

Nuage de points (point cloud)

Tous les scanners 3D effectuent l'acquisition d'un nuage de points (Fig. 1.4). Chaque point est représenté au minimum par ses coordonnées X, Y et Z. Les composantes couleurs (R, G, B, A) peuvent être ajoutées. [5]

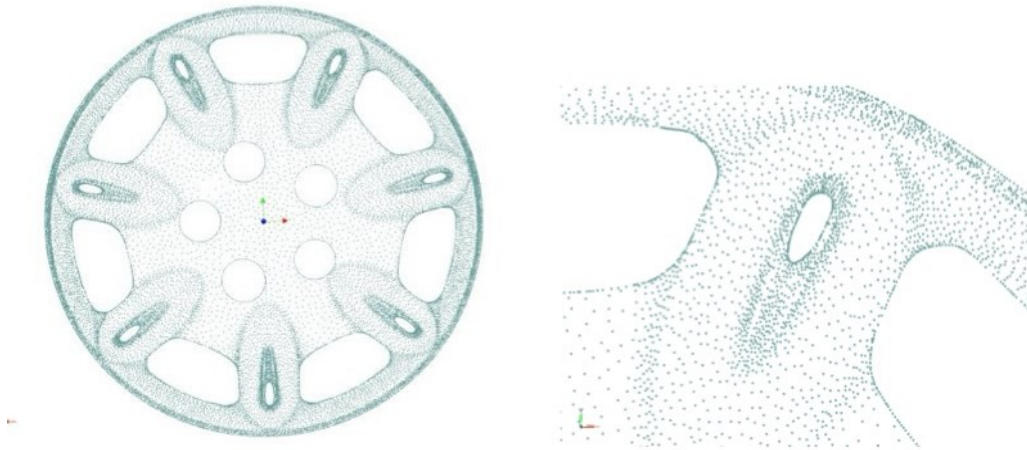


Figure 1.4 : Nuages de points [5]

Maillage (mesh)

Un maillage est généré par triangulation 2D ou 3D d'un nuage de points. Les maillages utilisés en numérisation 3D sont des maillages triangulaires où chaque facette est représentée par un triangle. Cette représentation est la plus courante en numérisation 3D (Fig. 1.5). Un modèle maillé est constitué de sommets, d'arêtes et de facettes. Les caractéristiques topologiques importantes sont les trous, le genre et le nombre de composantes connexes. Une arête n'appartenant qu'à une seule facette est appelée "bord" (ou "frontière"). Un polygone créé par des bords forme un trou de maillage. Le genre d'un objet correspond au nombre de trou topologique qu'il possède : le genre d'une sphère est 0, celui d'un tore est 1 ; La relation entre ces caractéristiques est donnée par l'équation d'Euler-Poincaré : $V - E + F - H = 2(C - G)$

Où V est le nombre de sommets, E le nombre d'arêtes, F le nombre de faces, H le nombre de trou, C le nombre de composantes connexes et G la somme des genres des composantes. Chaque facette d'un maillage possède une normale, correspondant au vecteur normal au plan supportant la facette. Ces normales permettent de définir l'intérieur et l'extérieur d'un objet et de réaliser un rendu. [5]

Cette représentation facilite les algorithmes d'intersection, de collision, de rendu et permet une visualisation rapide. Elle permet également de représenter des objets aux formes complexes.

Enfin, de nombreuses techniques permettent de générer des maillages à partir d'autres modèles géométriques (surfaces paramétriques, implicites ...).



Figure 1.5 : Modèle maillé [5]

1.2.3 Limites et sources d'erreurs

Précision : Les technologies de numérisation 3D permettent de capturer des détails extrêmement fins, rendant les modèles numériques très fidèles à la réalité.

Gain de temps : Comparé aux méthodes traditionnelles de modélisation, la numérisation 3D est beaucoup plus rapide et permet de reproduire rapidement des objets complexes.

Flexibilité : Les modèles numériques peuvent être facilement modifiés, analysés ou partagés entre différentes équipes ou départements, favorisant ainsi la collaboration.

Les défis et limites de la numérisation 3D

Malgré ses nombreux avantages, la numérisation 3D présente également certains défis et limites :

Coût : Les équipements de numérisation 3D de haute qualité peuvent être coûteux, ce qui limite parfois leur accessibilité aux petites entreprises ou aux particuliers.

Données massives : La numérisation 3D génère des volumes importants de données, notamment sous la forme de nuages de points. Le traitement, le stockage et la gestion de ces données nécessitent des ressources informatiques importantes.

Limites matérielles : Certains objets très brillants, transparents ou de petite taille peuvent être difficiles à numériser avec une grande précision, bien que des progrès technologiques soient en cours pour surmonter ces défis. [6]

L'avenir de la numérisation 3D

La numérisation 3D est un domaine en constante évolution, avec de nombreuses innovations qui améliorent ses capacités et son accessibilité. Les avancées dans l'informatique en nuage (cloud computing) et l'intelligence artificielle permettent d'améliorer le traitement des données et la qualité des modèles numériques (Fig. 1.6). De plus, l'intégration avec la réalité virtuelle (VR) et la réalité augmentée (AR) ouvre de nouvelles perspectives pour des applications immersives dans des secteurs comme l'éducation, le divertissement, et l'industrie.

Avec l'évolution de la technologie, la numérisation 3D devient de plus en plus accessible, permettant à un plus grand nombre d'entreprises, d'institutions culturelles et même de particuliers de profiter des avantages offerts par cette technologie révolutionnaire.

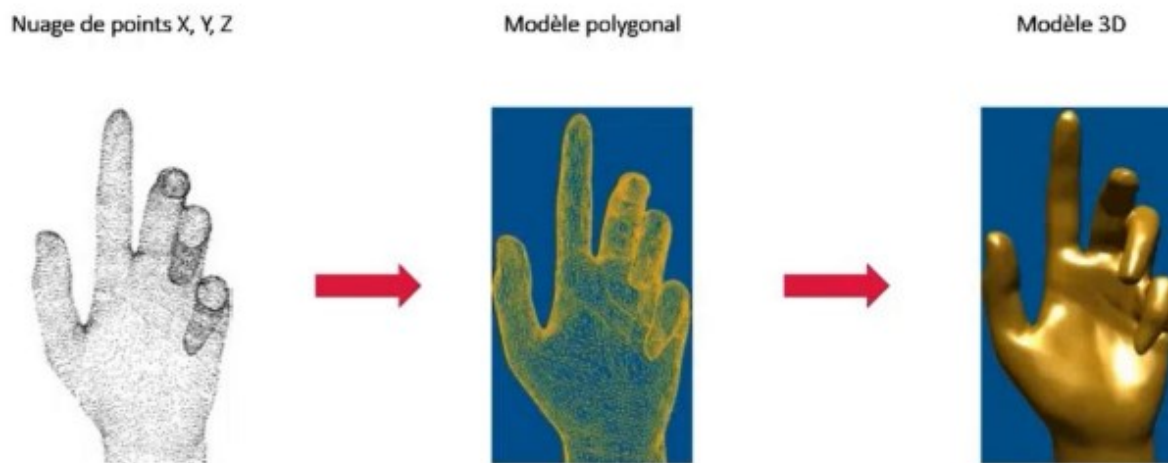


Figure 1.6 : Principe numérisation 3D [6]

La numérisation 3D constitue aujourd'hui un outil incontournable dans les domaines de l'ingénierie et de la fabrication avancée. Elle permet notamment la caractérisation géométrique précise des composants industriels, le contrôle dimensionnel, ainsi que les opérations de rétroconception de pièces complexes. Parmi les matériaux utilisés pour la fabrication de ces composants, les superalliages à base de nickel occupent une place

privilegiée grâce à leurs excellentes propriétés mécaniques et leur résistance aux environnements sévères. Il est donc essentiel de présenter les caractéristiques de ces matériaux avant d'aborder leurs procédés de fabrication, de contrôle ou de rétroconception.

1.3. Les superalliages de nickel

Les superalliages à base Ni sont des matériaux possédant une matrice dite γ , phase de type austénitique, qui est une solution solide de structure cubique à face centrée désordonnée à base de Ni contenant généralement des éléments d'additions (en substitution) contribuant à son renforcement tels que Co, Cr, Mo, et W. En effet, les rayons atomiques différents de ces éléments de substitution provoquent une distorsion du réseau impliquant une augmentation de la résistance au glissement des dislocations [15].

Suivant le type de superalliage, cette matrice est généralement renforcée par la précipitation d'une seconde phase dite γ' , qui est une phase stable de formule chimique $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}, \text{Ta})$. Cette phase est un composé intermétallique dérivé de la structure cubique à faces centrées : au centre des faces de la maille cubique, on trouve les atomes de nickel ou ceux des éléments de substitution (Cr, Co, Mo, W) et sur les sommets les atomes d'aluminium ou ceux des éléments de substitution (Ti, Ta, Nb). Cet arrangement atomique correspond à la structure ordonnée, dénommée L12 (« notation Strukturbericht »). Cette phase présente un faible écart de paramètre de maille avec celui de la matrice qui lui autorise une certaine cohérence avec celle-ci (Figure 1.7). [7]

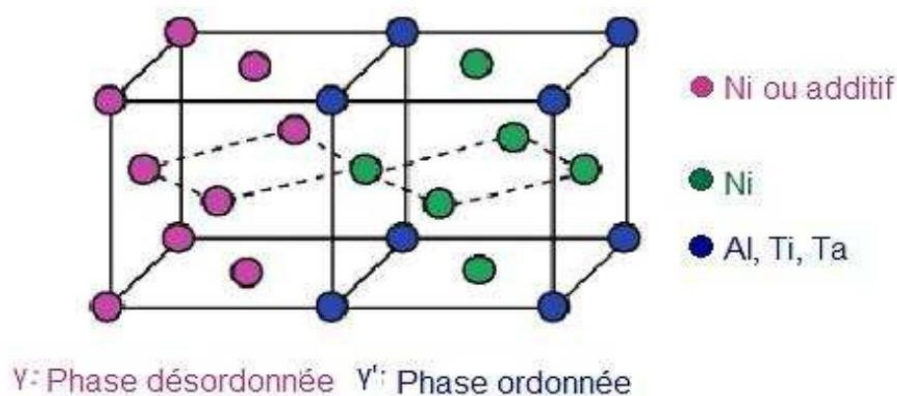


Figure 1.7 : Représentation schématique des principales phases dans les superalliages à base Ni [8]

En agissant sur la composition chimique de l'alliage, on peut obtenir des précipités autres que ceux de phase γ' , qui participent eux aussi au renforcement de la matrice. Parmi ces phases, on trouve par exemple la phase γ'' qui est une phase métastable, ordonnée, de composition

Ni_3Nb , de structure quadratique centrée de type DO_{22} ou bien la phase δ , également appelée β , de structure orthorhombique de type Do , qui est la phase stable de Ni_3Nb . [9]

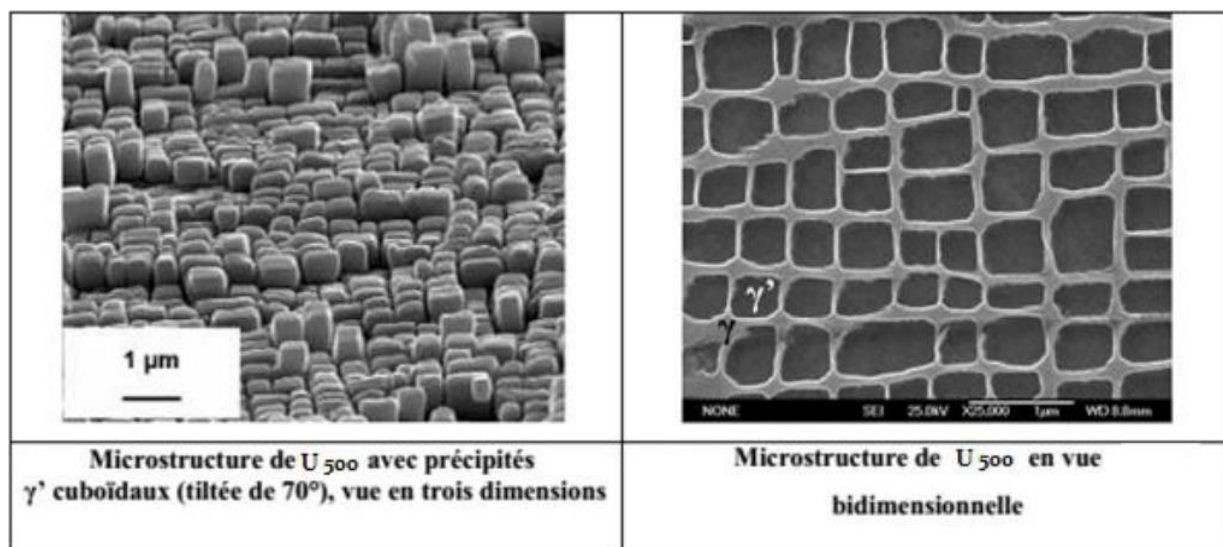


Figure 1.8: Les vues en 2D et 3D de la structure cristalline. [9]

Les superalliages à base Ni peuvent également être renforcés par la présence de carbures, nitrures et/ou de borures précipitant préférentiellement aux joints de grains. Le renforcement est observé à basse température si la fraction volumique des carbures/borures n'est pas trop importante. Dans le cas contraire, cela peut avoir une influence néfaste sur la vitesse de fluage ainsi que sur la résistance à la rupture. Parmi les carbures, deux catégories se distinguent : les carbures primaires de formule MX (où $\text{M} = \text{Ti}, \text{Nb}, \text{Mo}$, et $\text{X} = \text{C}, \text{N}$) et les carbures dits secondaires de formule M_3C , M_7C_3 et M_{23}C_6 ... pouvant être favorisés en fonction de la composition de l'alliage et notamment de la teneur en Mo, W, et Cr. Ces carbures étant riches en Ni, Nb, Mo, Cr, leur précipitation s'accompagne souvent d'un appauvrissement important de la matrice environnante en éléments d'alliage tels que Cr et Nb. L'ajout d'éléments d'addition permet donc le renforcement de la phase γ directement par solution solide ou bien par le biais de la formation de précipités d'autres phases (voir Tableau 1).

Eléments	Effets positifs recherchés	Effets négatifs
Cr	Renforce la phase γ , améliore la résistance à la corrosion à chaud et à l'oxydation, formation de carbures $M_{23}C_6$ *	Formation de carbures $M_{23}C_6$ *, favorise la formation de TCP
Mo	Renforce la phase γ , formation de carbures M_6C et MC *	Formation de carbures M_6C et MC *, augmente la densité
W	Renforce la phase γ	Favorise la formation de TCP, augmente la densité
Ta	Renforce la phase γ' , améliore la résistance à l'oxydation, formation de carbures MC *	Formation de carbures MC *, augmente la densité
Ti	Renforce la phase γ' , formation de carbures MC *	Formation de carbures MC *
Al	Précipitation de la phase γ' , améliore la résistance à l'oxydation.	
Nb, V	Renforce la phase γ , précipitation des phases γ'' et δ , formation de carbures MC *	Formation de carbures MC *
Co	Renforce la phase γ , augmente le solidus et peut augmenter ou diminuer le solvus.	
Re	Renforce la phase γ ralentit la déstabilisation de la structure γ/γ'	Augmente la densité
C	Formation de carbures*	Formation de carbures *
B, Zr	Améliore la résistance à la ductilité des joints de grains, inhibe la croissance des carbures	

Tableau 1.1 : Rôle des principaux éléments d'addition dans les superalliages à base Ni (*) La formation de carbures au sein de ces matériaux est complexe tant en nature, forme taille et localisation (inter-intragranulaire).

1.3.1. Les différents types des superalliages à base de nickel

Les alliages Nickel-Chrome ou « Inconel » :

Les « inconels » présentent une forte teneur en nickel et en chrome, leur conférant une résistance aux milieux oxydants et réducteurs. Ils sont adaptés aux milieux corrosifs à température élevée. Certains alliages présentent d'exceptionnelles tenues à la fatigue.

Les alliages Nickel-Cuivre ou « Monel » Les « monels » présentent une teneur en cuivre autour de 30 %. Ces alliages présentent une haute résistance mécanique, une bonne soudabilité et une excellente tenue à la corrosion dans une vaste gamme de températures et de

conditions d'environnement.

Les alliages Nickel/Chrome-Molybdène/Fer ou « Hastelloy »

Les « hastelloys » sont spécialement résistants aux milieux corrosifs aussi bien oxydants que réducteurs. Leur polyvalence et leur tenue à la fatigue en font des alliages utilisés en chimie fine. Certains sont utilisés en incinération d'ordures ménagères.

Les alliages Nickel-Fer-Chrome ou « Incoloy »

Le nom de marque déposée, Incoloy, est appliqué en tant que nom de préfixe à plusieurs alliages métalliques, à haute résistance à la corrosion et fortement résistant aux températures élevées, produit par des Corporation Spéciale en Métaux. Ces alliages Incoloy sont des alliages à base de nickel qui révèlent des caractéristiques qui incluent une bonne résistance à la corrosion dans des milieux aqueux, l'excellente force et résistance à l'oxydation dans des milieux à haute température, le fluage de bonne résistance à la rupture, et la facilité de fabrication.

1.4 Techniques de fabrication adaptées aux pièces complexes

1.4.1 Usinage CNC

Définition et principe

L'usinage à commande numérique par ordinateur (Computer Numerical Control – CNC) est un procédé de fabrication soustractif permettant de produire des pièces de haute précision à partir d'un modèle numérique. Les mouvements de la machine-outil sont pilotés automatiquement par un programme informatique, garantissant une excellente répétabilité et une grande précision géométrique.

Grâce à son haut niveau d'automatisation, l'usinage CNC est largement utilisé dans les secteurs de l'aéronautique, de l'automobile, du médical et de l'énergie pour la fabrication de pièces complexes présentant des tolérances dimensionnelles strictes. [10]



Figure 1.9 : Centre d'usinage CNC industriel

Constitution d'un système CNC

Un système d'usinage CNC comprend plusieurs éléments essentiels :

- La machine-outil : assure les opérations de coupe, de perçage, de fraisage ou de tournage.
- Le contrôleur numérique : interprète le programme d'usinage et commande les mouvements des axes et de la broche.
- Le logiciel CAO/FAO : permet respectivement la conception de la pièce et la génération des trajectoires d'outils.
- Les outils de coupe : réalisent l'enlèvement de matière selon les conditions de coupe définies.
- Les dispositifs de bridage : assurent le maintien précis de la pièce pendant l'usinage.

Chaîne numérique de fabrication

Le processus d'usinage CNC suit généralement les étapes suivantes :

1. Conception de la pièce à l'aide d'un logiciel de CAO.
2. Génération des trajectoires d'outils dans un logiciel de FAO.
3. Post-traitement et création du programme CN (codes G et M).
4. Préparation de la machine et montage de la pièce.
5. Exécution de l'usinage.
6. Contrôle dimensionnel et validation de la conformité de la pièce.

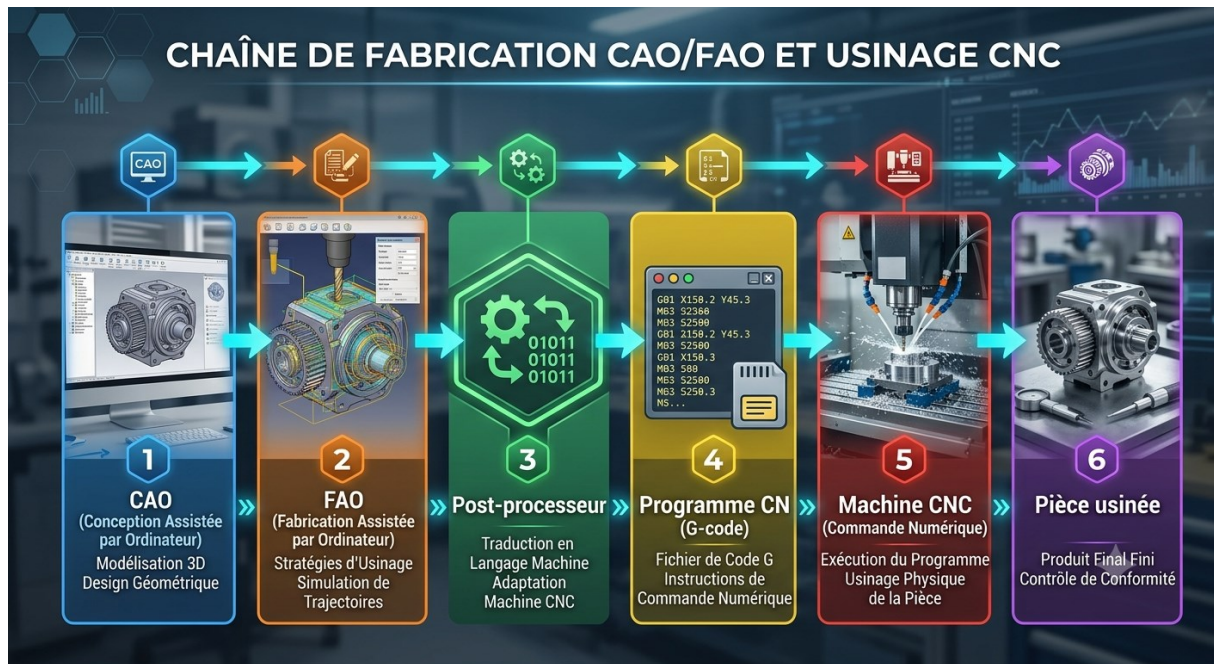


Figure 1.10 : Chaîne de fabrication CAO/FAO et usinage CNC

Cette chaîne numérique permet de réduire les erreurs de fabrication tout en assurant une qualité constante des pièces produites.

Principales technologies d'usinage CNC

1.4.1.1 Fraisage CNC

Le fraisage CNC est un procédé d'usinage dans lequel l'enlèvement de matière est réalisé à l'aide d'un outil rotatif appelé fraise. Les mouvements coordonnés de l'outil et de la pièce permettent de générer des surfaces planes, profilées ou tridimensionnelles avec une grande précision.

Les centres de fraisage CNC sont généralement classés selon le nombre d'axes contrôlés :

- **3 axes** : déplacements selon X, Y et Z ;
- **4 axes** : ajout d'un axe de rotation permettant l'usinage de plusieurs faces sans repositionnement ;
- **5 axes** : mouvements simultanés sur cinq axes offrant une grande flexibilité pour la réalisation de formes complexes.

Le fraisage CNC est particulièrement adapté à la fabrication de pièces aéronautiques, de moules, d'aubes de turbines et de composants mécaniques à géométrie complexe.

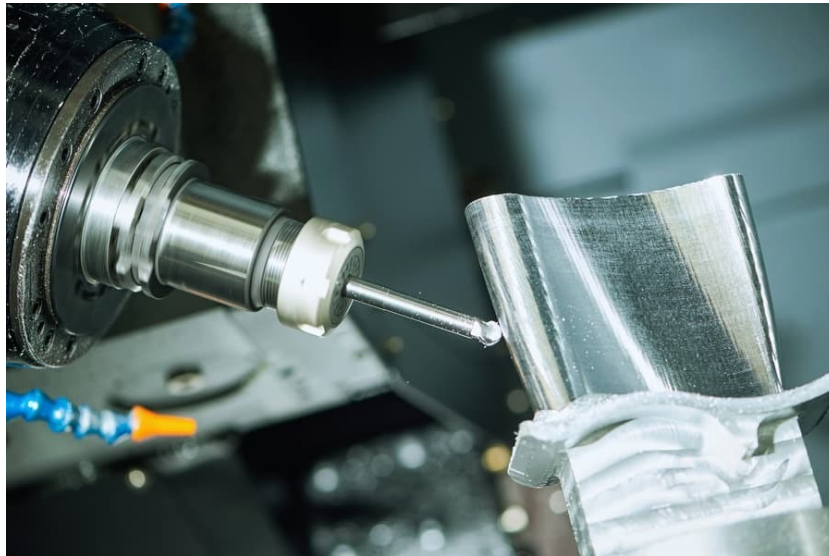


Figure 1.11 : Opération de fraisage CNC

1.4.1.2 Tournage CNC

Le tournage CNC est un procédé dans lequel la pièce est mise en rotation tandis qu'un outil de coupe enlève progressivement la matière. Ce procédé est principalement destiné à la fabrication de pièces de révolution.

Les tours CNC permettent la réalisation de surfaces cylindriques, coniques, filetées ou profilées avec une excellente précision dimensionnelle. Ils sont largement utilisés pour la production d'arbres, d'axes, de bagues, de vis et de composants destinés aux secteurs automobile, énergétique et aéronautique.



Figure 1.12 : Tour à commande numérique (CNC)

1.4.1.3 Rectification CNC

La rectification CNC est un procédé de finition utilisant une meule abrasive pour enlever une faible quantité de matière. Elle est généralement appliquée après les opérations d'usinage conventionnelles afin d'améliorer la qualité géométrique et l'état de surface des pièces.

Cette technique permet d'obtenir des rugosités très faibles ainsi que des tolérances dimensionnelles particulièrement serrées. Elle est fréquemment utilisée pour la fabrication d'engrenages, d'outils de coupe, de roulements et de composants de haute précision.

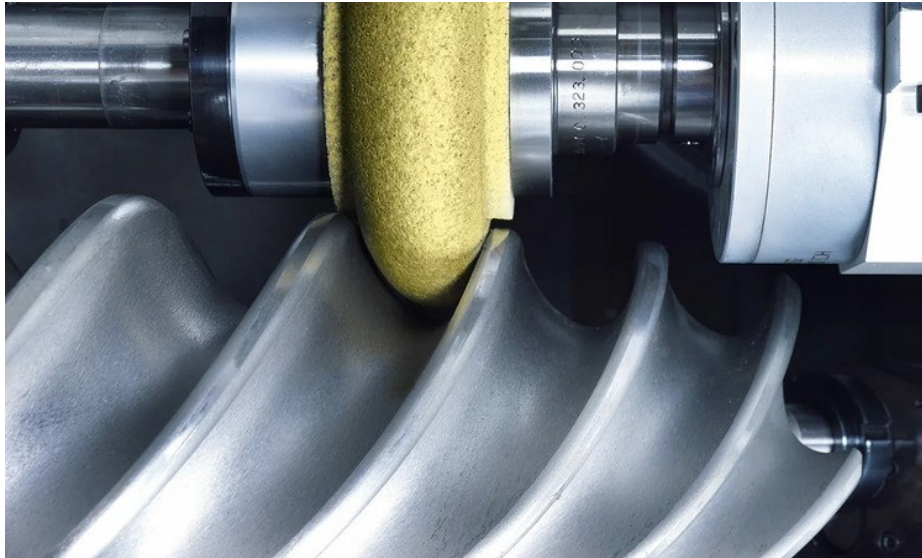


Figure 1.13 : Opération de rectification CNC

1.4.1.4 Électroérosion CNC (EDM)

L'électroérosion à commande numérique (Electrical Discharge Machining – EDM) est un procédé d'usinage non conventionnel reposant sur l'enlèvement de matière par une succession de décharges électriques entre une électrode et la pièce à usiner.

Cette technologie est particulièrement adaptée à l'usinage des matériaux très durs ou difficiles à couper par des procédés conventionnels. Elle permet également de produire des formes complexes, des cavités profondes et des détails de très petites dimensions avec une excellente précision. L'EDM est largement utilisée dans la fabrication des moules, matrices et composants aéronautiques.



Figure 1.14 : Machines EDM

1.4.1.5 Usinage Laser CNC

L'usinage laser CNC utilise un faisceau laser de forte densité énergétique pour découper, percer, graver ou marquer les matériaux. Le faisceau est guidé avec précision par un système de commande numérique permettant d'exécuter des trajectoires complexes sans contact mécanique avec la pièce.

Cette technologie offre une grande précision, une zone affectée thermiquement réduite et une excellente qualité de coupe. Elle est particulièrement adaptée à l'usinage de tôles minces, de superalliages, de matériaux composites ainsi que de pièces présentant des géométries complexes. Les applications concernent notamment les industries aéronautique, automobile, électronique et médicale.

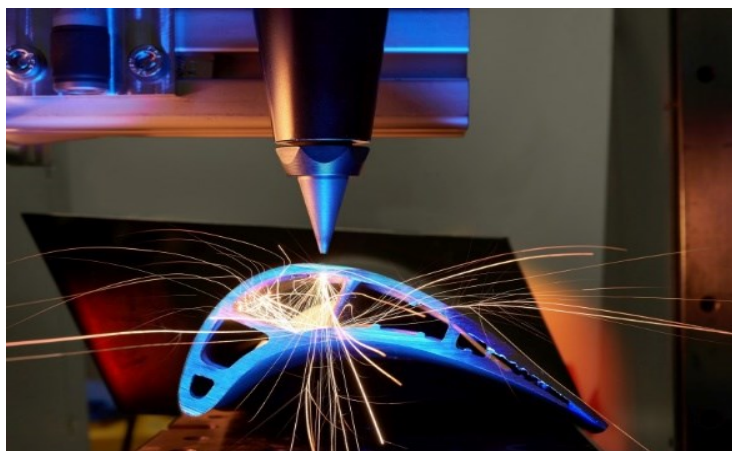


Figure 1.15 : opération de perçage par Laser

1.4.2 Programmation CNC

La programmation CNC constitue l'étape qui permet de traduire le modèle numérique d'une pièce en instructions compréhensibles par la machine-outil. Cette programmation est généralement réalisée à l'aide d'un logiciel de fabrication assistée par ordinateur (FAO), qui génère automatiquement les trajectoires d'outils à partir du modèle CAO. Le programme obtenu est ensuite adapté à la machine concernée grâce à un post-processeur, puis transféré vers la commande numérique pour exécution.

Les instructions d'usinage sont principalement définies à l'aide de deux types de codes :

- **Les codes G (Geometric Codes)** : ils commandent les mouvements de la machine, notamment les déplacements linéaires et circulaires, les trajectoires d'outils, les vitesses d'avance et les cycles d'usinage.
- **Les codes M (Miscellaneous Codes)** : ils assurent le contrôle des fonctions auxiliaires de la machine telles que la mise en marche ou l'arrêt de la broche, l'activation du liquide de refroidissement, le changement d'outil ou encore l'arrêt du programme.

L'utilisation de logiciels FAO modernes permet également de simuler les opérations d'usinage avant leur exécution réelle, afin de détecter d'éventuelles collisions, d'optimiser les trajectoires d'outils et de réduire les temps de fabrication.

1.4.2.1 Avantages de l'usinage CNC

L'usinage CNC présente de nombreux avantages qui expliquent son adoption massive dans l'industrie moderne. Il offre une grande précision dimensionnelle ainsi qu'une excellente répétabilité, garantissant la production de pièces conformes aux spécifications. Les centres d'usinage multi-axes permettent également la réalisation de géométries complexes difficilement réalisables par des procédés conventionnels. Par ailleurs, l'automatisation du procédé améliore la productivité, réduit les temps de fabrication et limite les erreurs humaines. L'usinage CNC est compatible avec une large variété de matériaux, notamment les métaux, les polymères et les matériaux composites, tout en contribuant à la réduction des pertes de matière grâce à l'optimisation des trajectoires d'outils.

1.4.2.2 Limites de l'usinage CNC

Malgré ses nombreux avantages, l'usinage CNC présente certaines limitations. L'investissement initial lié à l'acquisition des machines, des logiciels et des équipements périphériques demeure relativement élevé. La préparation et la programmation des opérations nécessitent également du temps et des compétences spécialisées. Certaines pièces requièrent des montages ou des outillages spécifiques, ce qui peut augmenter les coûts de production. De plus, l'accès à certaines géométries internes ou cavités profondes reste limité par les contraintes cinématiques des outils de coupe. Enfin, pour la fabrication de pièces unitaires ou de très petites séries, les coûts de préparation peuvent rendre ce procédé moins économique.

1.4.3 Impression 3D métal (SLM/DED)

La définition de l'impression 3D SLM

L'impression 3D SLM correspond à une fusion sélective par laser (Selective Laser Melting). C'est un procédé d'impression 3D métallique qui utilise un laser pour fusionner de fines couches de poudre métallique en une structure solide. Elle fait partie de la grande famille de la « fabrication additive », avec des procédés comme l'impression 3D SLS et l'impression 3D FDM. Quiconque souhaite fabriquer des pièces métalliques légères et très résistantes aux propriétés supérieures devrait envisager cette technologie.

Comment ça fonctionne ?

L'impression 3D SLM suit le même processus que le SLS, avec une différence essentielle : alors que le SLS utilise un laser pour faire fondre de la poudre polymère en structures solides, le 3D SLM utilise un laser pour fusionner sélectivement de la poudre métallique en structures solides. [11]

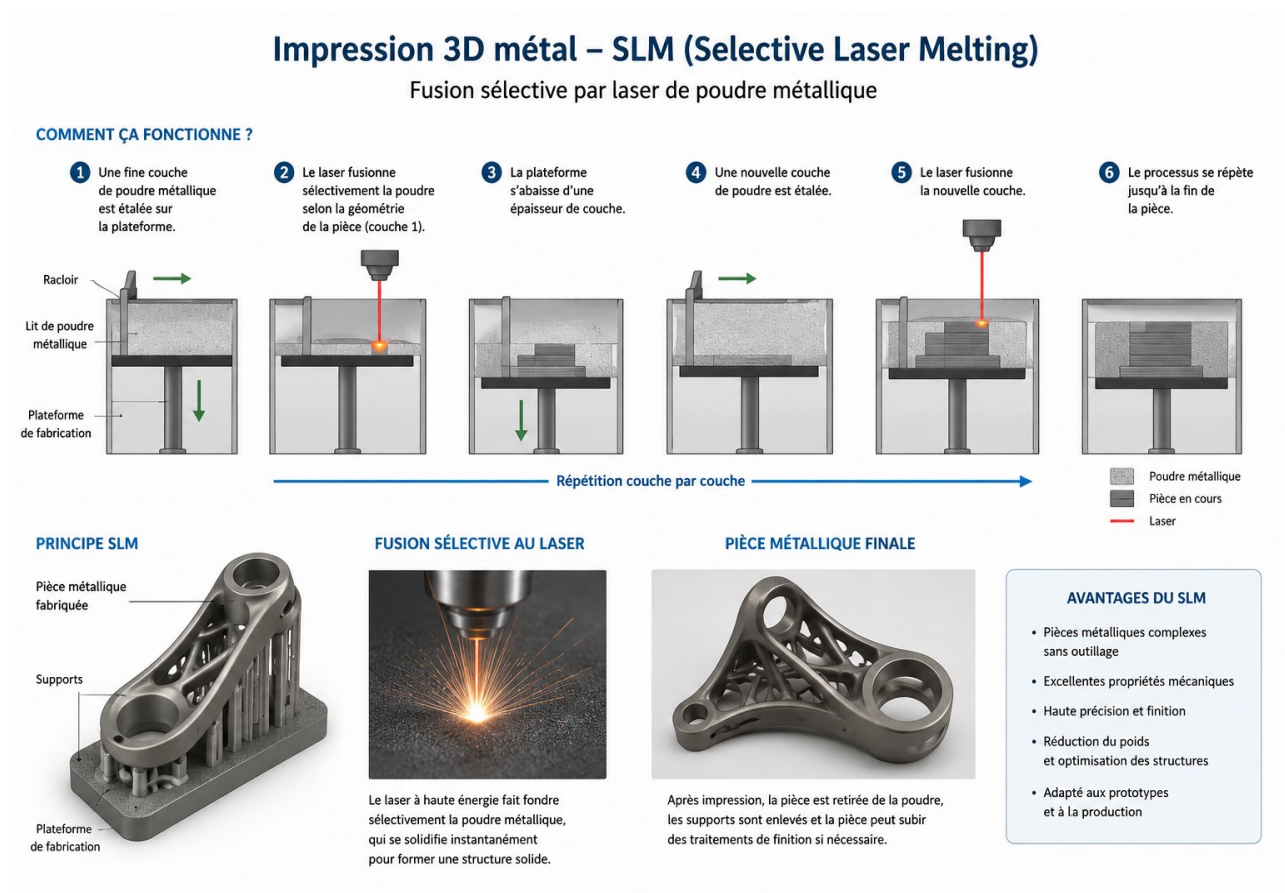


Figure 1.16 : Principe de l'impression 3D métal par fusion sélective au laser (SLM)

L'utilisation de l'impression 3D SLM

Le SLM est l'une des techniques de fabrication additive métal les plus utilisées en raison de sa capacité à produire des pièces à haute résistance présentant des géométries complexes et de grandes surfaces. Cependant, elle apparaît relativement coûteuse par rapport à d'autres méthodes plus traditionnelles du travail du métal.

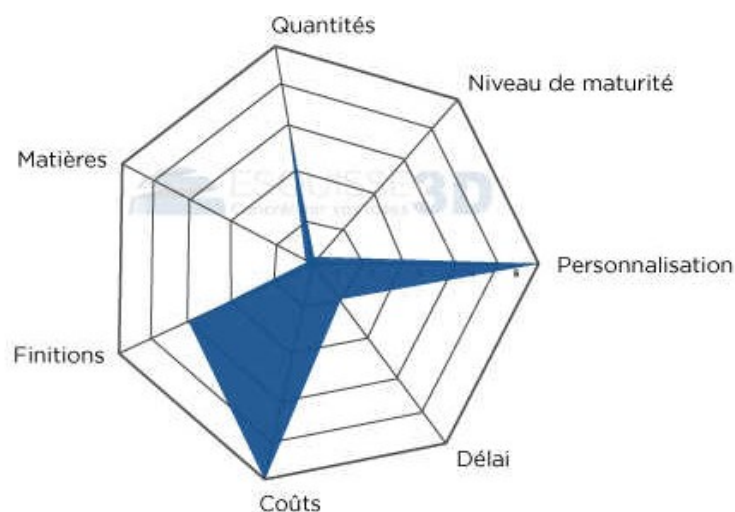


Figure 1.17 : Diagramme radar des caractéristiques de la fabrication additive

Les avantages de la SLM

L'impression 3D SLM est un procédé qui permet de créer des géométries complexes impossibles à réaliser avec d'autres procédés. Cela signifie que vous pouvez créer des pièces avec des conceptions et des fonctions complexes avec un minimum d'effort. Ce qui rend cette technique idéale pour le prototypage et les petites séries de production. En outre, la SLM crée des pièces présentant une excellente résistance et durabilité. Un avantage important donc par rapport aux procédés de fabrication standard tels que le moulage par fonderie ou encore l'usinage. [9]

Les inconvénients de la SLM

Le procédé présente toutefois un certain nombre d'inconvénients. Tout d'abord, la gamme de matériaux pouvant être utilisés est limitée. Le faisceau laser doit avoir une puissance suffisante pour faire fondre et fusionner la poudre métallique en une pièce cohérente. Cela signifie que la plupart des métaux ne peuvent pas être traités avec un système SLM, sauf sous forme de poudre. [11]

En outre, l'environnement pour faire fonctionner ces machines doit être contrôlé. Car le métal pulvérulent est extrêmement inflammable et dangereux pour la santé.

La SLM reste actuellement très coûteux par rapport à d'autres procédés de fabrication additive tels que la FDM ou la SLS, en raison de ses besoins élevés en énergie. Néanmoins cela pourrait changer à mesure que d'autres entreprises entrent sur ce marché.

1.4.4 Moulage sous pression

Définition

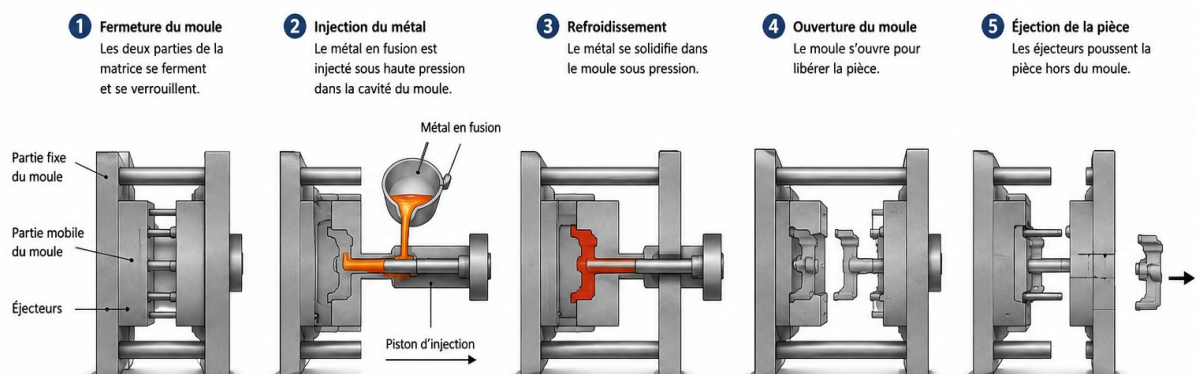
Le moulage sous pression est un procédé de moulage de métaux polyvalent et efficace connu pour produire des pièces métalliques géométriquement complexes à l'aide de moules réutilisables, appelés matrices. Ce processus consiste à forcer le métal en fusion sous haute pression dans ces moules, une méthode particulièrement appréciée pour la production en série de composants avec précision, répétabilité et un haut degré de finition de surface.

Apparu au milieu du XIX^e siècle, le moulage sous pression a été initialement développé pour créer des caractères mobiles destinés à l'industrie de l'imprimerie, mais son potentiel s'est rapidement étendu à d'autres secteurs, notamment l'automobile, l'aérospatiale et l'électronique. Aujourd'hui, elle utilise principalement des métaux non ferreux, tels que l'aluminium, le zinc et le magnésium, ce qui en fait la pierre angulaire de la fabrication d'une large gamme de produits, depuis les minuscules jouets complexes jusqu'aux composants automobiles critiques.

Ce qui distingue le moulage sous pression des autres méthodes de moulage, c'est sa capacité à produire des pièces avec des tolérances serrées et un usinage minimal. Les avantages économiques associés à la grande durabilité des pièces moulées sous pression en font également un choix privilégié parmi les fabricants visant à réduire les déchets de matériaux et à augmenter la productivité. [12]

Moulage sous pression (Die Casting)

Le métal en fusion est injecté sous haute pression dans un moule réutilisable (matrice) pour produire des pièces métalliques complexes avec précision et finition élevée.



Exemples de pièces obtenues par moulage sous pression



Figure 1.18 : Moulage sous pression

Principe de fonctionnement

Étape 1 : Préparation du moule

Les moules de moulage sous pression sont disponibles en différentes tailles et conceptions, et vous devriez considérer les types suivants :

Les moules à cavité unique sont le type de moule à matrice le plus simple, comportant une cavité et capables de produire une pièce par cycle.

Les moules à cavités multiples ont une conception plus complexe caractérisée par des cavités identiques dans un seul moule. Ils peuvent produire plusieurs pièces identiques par cycle ; par conséquent, ils sont utilisés dans la production en série d'une seule pièce. [12]

Les moules combinés sont dotés d'empreintes de différentes conceptions. Ils sont donc plus flexibles et peuvent créer différents types de pièces par cycle.

Le moule unitaire est un moule spécial adapté à la fabrication de pièces aux géométries complexes sans réduire la précision. Des exemples sont des produits moulés sous pression avec des inserts coulés ou des parois minces.

Après avoir fabriqué le moule, nettoyez-le pour éliminer les contaminants pouvant affecter la qualité de la pièce. De plus, préchauffez-le pour éviter les défauts thermiques comme les fissures. Des fissures peuvent se produire lorsqu'il existe une différence de température significative entre un moule et le métal liquide.

Étape 2 : processus d'injection

L'injection dépend du fait qu'il s'agisse d'un système à chambre chaude ou froide. Pour un système de chambre froide, la fusion a lieu à l'extérieur de la machine de coulée. D'autre part, la fusion a lieu à l'intérieur de la machine de coulée à chambre chaude. Ensuite, injectez le matériau à la bonne pression dans le moule.

Étape 3 : Refroidissement

Laissez le métal fondu refroidir et se solidifier pour former la pièce finale. Le refroidissement doit avoir lieu alors que le moule est encore serré. De plus, en fonction de la variation du moulage sous pression, un refroidissement peut se produire tout en maintenant ou en ajoutant de la pression. Par exemple, dans le moulage sous pression, le refroidissement se produit sous pression continue pour éviter le retrait.

Étape 4 : Éjection

Après solidification complète de la pièce moulée, desserrez le moule pour activer les éjecteurs de la machine. Cela fera sortir la partie solidifiée. L'éjection de la pièce peut être plus facile en lubrifiant le moule avant l'injection du métal en fusion et en incorporant un angle de dépouille.

Étape 5 : Tailler

Les pièces moulées sous pression subissent un détourage pour éliminer les bavures et autres défauts qui laissent un excès de matériaux sur la pièce. Le détourage parallèlement à certains processus de post-usinage tels que le meulage peut également être utilisé pour garantir une tolérance plus stricte. De plus, les moulages sous pression peuvent subir d'autres traitements de surfaces métalliques pour des propriétés mécaniques, des fonctionnalités et une esthétique améliorée.

Variantes de la Processus de moulage sous pression

Le processus de fabrication présente différentes variantes qui modifient le modèle général pour améliorer la fonctionnalité ou la valeur esthétique. Ils comprennent :

Moulage sous pression par gravité

Le moulage par gravité diffère du moulage sous pression traditionnel en utilisant la gravité pour le remplissage du moule. Les avantages du processus comprennent une consommation d'énergie réduite, une génération de déchets, un emprisonnement d'air et une précision dimensionnelle élevée. Le processus de moulage est applicable dans l'industrie automobile pour fabriquer des pièces structurelles telles que des blocs moteurs, des culasses, des corps de pompe et des carters de boîte de vitesses. [10]

Moulage sous pression

Le moulage sous pression est classé en deux types : coulée sous basse pression (LPDC) et moulage sous haute pression (HPDC). Chacun présente des avantages basés sur le mécanisme de remplissage. Le remplissage du HPDC s'effectue à haute pression (1000 25000 psi à 0.08 0.1 psi), ce qui le rend rapide et adapté à la production de pièces à parois minces. En LPDC, le remplissage s'effectue à basse pression (XNUMXMPa à XNUMXMPa). Cela empêche le piégeage de l'air et le rend approprié pour la fabrication de pièces dimensionnellement précises et non poreuses.

Le moulage sous pression est applicable à l'usinage de haute précision. Par exemple, les industries aérospatiale et automobile l'utilisent dans la fabrication de pièces structurelles, de blocs moteurs et de culasses, tandis que l'industrie électronique l'utilise dans la fabrication de boîtiers électroniques.

Coulée sous vide

La coulée sous vide ne diffère que par l'utilisation d'un vide pour éviter l'emprisonnement d'air. Cela conduit à une finition de surface et une précision dimensionnelle améliorées. Le processus de coulée est applicable dans les industries automobile, médicale et aérospatiale. Les pièces communes fabriquées comprennent des carters de transmission, des implants en aluminium et des supports.

Moulage sous pression

Les pièces moulées par compression présentent des avantages tels que des propriétés mécaniques améliorées, une porosité réduite et une précision dimensionnelle plus élevée. Par conséquent, ils sont courants dans l'industrie automobile pour fabriquer des composants tels que des suspensions, des fusées d'essieu et des transmissions.

Moulage sous pression semi-solide

Le moulage sous pression semi-solide, également connu sous le nom de thixomoulage ou rhéomoulage, produit des pièces avec des tolérances serrées et une précision dimensionnelle. Ils sont applicables à la fabrication de pièces aux géométries complexes telles que les transmissions, les supports de moteur et les boîtiers électroniques

Applications et utilisations du moulage sous pression

Le moulage sous pression est applicable dans les industries utilisant des matériaux non ferreux comme l'aluminium, le zinc et le magnésium. Les exemples comprennent :

Industrie aérospatiale

L'industrie aérospatiale utilise le moulage de métaux pour fabriquer des composants de moteurs d'avion, tels que des boîtiers et des supports, en utilisant des alliages d'aluminium (par exemple, ADC12, A380) et des alliages de magnésium (par exemple, AZ91D).

L'industrie s'appuie sur le processus de fabrication en raison de son adéquation aux matériaux avec lesquels elle travaille, par exemple l'aluminium, le magnésium, etc. De plus, il garantit la précision dimensionnelle et est compatible avec les géométries complexes propres à l'industrie.

Automobile

L'industrie automobile utilise le processus de fabrication pour fabriquer des composants de moteur tels que des culasses, des carters de transmission, des blocs et des pièces de carrosserie telles que des jantes et des poignées de porte. Exemples de moulage sous pression automobile les matériaux utilisés dans l'industrie comprennent les alliages d'aluminium (par exemple, ADC12, A380), les alliages de zinc (par exemple, ZAMAK) et les alliages de magnésium (par exemple, AZ91D).

Vitrines et Écrans Numériques

Il est applicable à la fabrication de composants électroniques tels que des connecteurs, des dissipateurs thermiques et des boîtiers utilisant des alliages d'aluminium (par exemple, ADC12, A380), des alliages de zinc (par exemple, ZAMAK) et des alliages de magnésium (par exemple, AZ91D). Le processus de fabrication permet de fabriquer avec précision des pièces présentant des détails complexes communs à l'industrie électronique.

Produits de consommation

Les produits de consommation tels que les appareils de cuisine, les outils électriques et autres matériels sont fabriqués à l'aide d'un processus de moulage sous pression utilisant un alliage d'aluminium, de zinc et d'étain. Le moulage sous pression offre une productivité, une production de masse et une rentabilité élevées, qui sont importantes dans la fabrication de ces produits.

1.4.5 Critères de choix du procédé et du matériau

Le choix d'un matériau (fonte, aluminium, acier, cuivreux, ...) et du process de fabrication (fonderie, forge, emboutissage, extrusion, ...) dépend en première approche de 4 familles de critères ; technique (intrinsèque lié au matériau), économique (coût récurrent et coût non récurrent), technologique (lié au process de transformation ou d'assemblage) et d'écoconception. Le choix final résulte souvent d'un compromis entre ces différents critères. [13]

Les critères techniques : ils peuvent intégrer, en fonction du CdC de la pièce, et des contraintes en fonctionnement :

- Les caractéristiques mécaniques (R_m , $R_{p0.2}$, allongement, limite d'endurance en fatigue)
- La tenue en fonctionnement à chaud (220°C, 400°C, ...) en continue où en pointe
- La masse volumique (recherche d'allègement) La résistance à l'usure
- La conductivité ou la diffusivité thermique (ou électrique)
- La tenue à la corrosion (brouillard salin pour l'automobile)

Les critères économiques : sous le critère économique, on peut intégrer plus généralement la maîtrise des approvisionnements, la disponibilité des sources ou l'évolution prévisible des prix. Il est donc nécessaire de prendre en compte :

- Le prix matière (et son évolution possible)
- La facilité de trouver un fournisseur (sources d'approvisionnement) avec le process et le matériau retenu
- Les coûts récurrents (VA process) et les coûts non récurrents (prototype, outillage de série, mise au point initiale, échantillons initiaux) et la durée de vie des outillages
- Les autres coûts indirects (emballage, transport, ..., contrôle qualité)

Les critères technologiques : les critères technologiques liés à l'environnement de la pièce influent sur la facilité de réalisation de sous-ensemble.

- L'assemblage (avec d'autres matériaux)
- L'usinabilité ou la possibilité de déformation (à froid ou à chaud)
- La possibilité d'automatisation du process de fabrication
- Les traitements thermiques ou traitements de surface ultérieurs (anti-corrosion, ...)

Les critères d'écoconception : ces critères sont plus récents (et liés au concept de développement durable) et plus donc plus difficiles à évaluer de manière pertinente et objective faute de recul et de données fiables et tenant compte de l'impact sur la totalité du cycle de vie du produit. Ces critères peuvent intégrer :

- L'impact en termes d'émission de CO₂ (ou de gaz à effet de serre plus globalement) du matériau et du process retenu (en intégrant la production primaire, le transport, ...)
- L'impact en termes de facilité de recyclage ou de facilité de démontage en fin de vie du produit
- L'épuisement (ou non) de la réserve mondiale de matériau et la possibilité de trouver facilement des matériaux de substitution pour remplir la même fonction
- Impact sociétal.

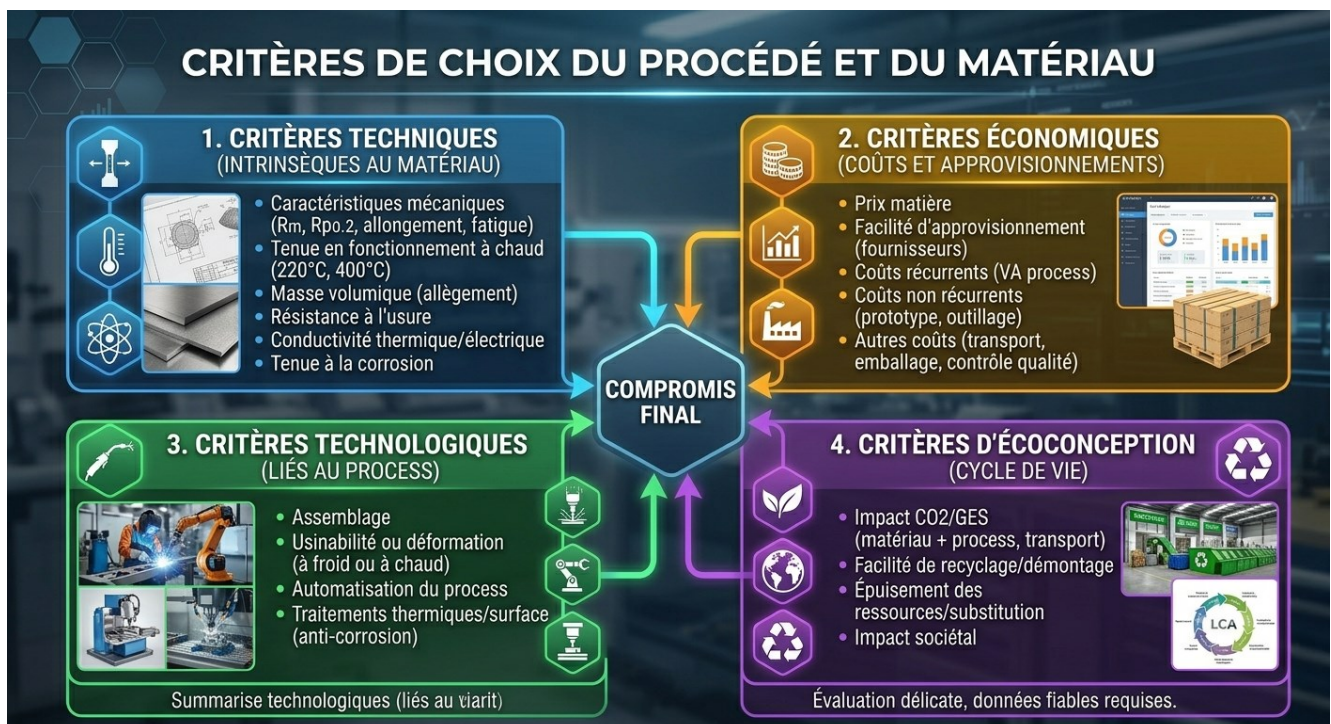


Figure 1.19 : Critères de choix du procédé et du matériau

Conclusion

Ce premier chapitre a permis de poser les bases théoriques et technologiques nécessaires à la compréhension de la démarche de rétroconception appliquée aux composants industriels complexes.

Après avoir défini les principes fondamentaux de la rétroconception et son évolution historique, nous avons présenté les différentes technologies de numérisation 3D, en soulignant l'importance des nuages de points et des maillages dans la capture fidèle des géométries réelles. Les superalliages à base de nickel ont été étudiés en raison de leur large utilisation dans les environnements sévères, notamment pour les ailettes de turbine. Enfin, un panorama des procédés de fabrication avancés (usinage CNC, impression 3D métal, moulage sous pression) a été dressé, en mettant l'accent sur leurs avantages, leurs limites et les critères de choix.

Ces éléments constituent un socle solide pour aborder, dans les chapitres suivants, la mise en œuvre pratique de la rétroconception sur une pièce réelle endommagée, ainsi que sa reconstruction et sa fabrication par impression 3D.

Chapitre 2

Analyse de la Pièce et Rétroconception

2.1. Présentation et choix de la pièce complexe

2.1.1. Description géométrique et fonctionnelle

La pièce étudiée est une ailette de turbine, caractérisée par une géométrie tridimensionnelle complexe, conçue pour optimiser l'interaction entre le fluide en écoulement et la structure solide. Cette géométrie résulte d'un compromis entre les exigences aérodynamiques, thermiques et mécaniques, dans le but d'assurer un rendement énergétique élevé.

Sur le plan géométrique, l'ailette est constituée de deux parties principales : le profil aérodynamique et le pied de fixation. Le profil présente une forme incurvée avec une section variable le long de son axe, permettant de guider et d'accélérer le fluide tout en minimisant les pertes dues à la turbulence et aux phénomènes de séparation de l'écoulement. La variation de l'épaisseur est optimisée afin d'assurer une bonne résistance mécanique, notamment dans les zones fortement sollicitées.

Le pied de l'ailette constitue la zone de liaison avec le disque du rotor. Il présente généralement une géométrie de type queue d'aronde, garantissant un ancrage solide et une transmission efficace des efforts mécaniques, en particulier les forces centrifuges et les charges dynamiques.

Lors de l'observation de la pièce étudiée, une dégradation au niveau du pied a été constatée. Cette défaillance peut se manifester sous forme d'endommagement localisé ou d'initiation de fissure, probablement due aux contraintes mécaniques élevées, aux sollicitations cycliques ou aux effets thermiques importants. Ce type de dégradation peut affecter la tenue mécanique de l'ailette et représente un facteur critique dans la durée de vie de la pièce.

Du point de vue fonctionnel, l'ailette assure la conversion de l'énergie cinétique et thermique du fluide en énergie mécanique de rotation. Le fluide exerce des efforts sur le profil, générant ainsi un couple moteur entraînant la rotation du rotor. Cette interaction fluide-structure est essentielle pour le bon fonctionnement des turbines.

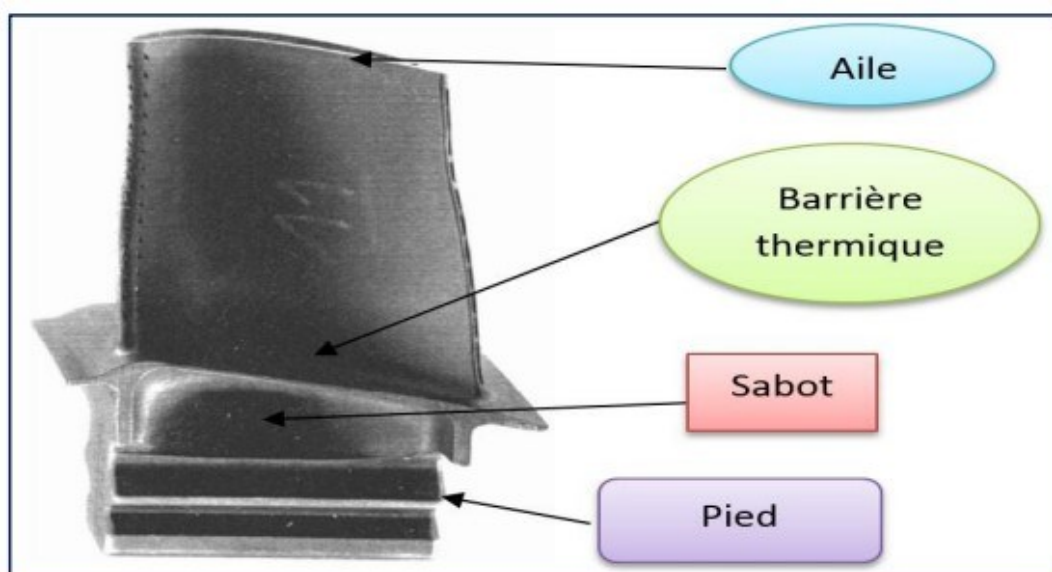


Figure 2.1 : Ailette de turbine

Enfin, les conditions sévères de fonctionnement, caractérisées par des températures élevées, des gradients thermiques importants et des sollicitations répétées, imposent une conception robuste. L'ailette doit ainsi présenter une résistance élevée à la fatigue, au fluage et à l'oxydation. [14]



Figure 2.2 : Ailette endommagée (ailette turbine mobile)

2.1.2. Contraintes d'utilisation : charges, vibrations, thermique

La pièce étudiée, appartenant à un système de turbine, est soumise à des contraintes d'utilisation particulièrement sévères liées à son environnement de fonctionnement. Sur le plan mécanique, elle est principalement sollicitée par des efforts centrifuges importants dus à la rotation à grande vitesse, ainsi que par des contraintes de flexion et de traction générées par l'écoulement du fluide. Ces sollicitations combinées entraînent des concentrations de contraintes au niveau des zones critiques, notamment aux racines et aux arêtes de la pièce. [15]

En outre, la pièce est exposée à des sollicitations dynamiques et à des vibrations continues, favorisant l'apparition de phénomènes de fatigue mécanique. Les cycles de chargement répétés peuvent conduire à l'initiation et à la propagation de fissures, réduisant progressivement la durée de vie en service.

Du point de vue thermique, la pièce fonctionne dans un environnement à haute température, caractérisé par des gradients thermiques importants. Ces conditions induisent des dilatations différentielles et des contraintes thermiques internes susceptibles de provoquer des déformations ou une perte de propriétés mécaniques du matériau.

Enfin, l'environnement de la turbine peut inclure des phénomènes d'oxydation, d'érosion et de corrosion dus aux gaz chauds et aux particules en suspension, ce qui accélère la dégradation de la surface et affecte les performances aérodynamiques de la pièce.

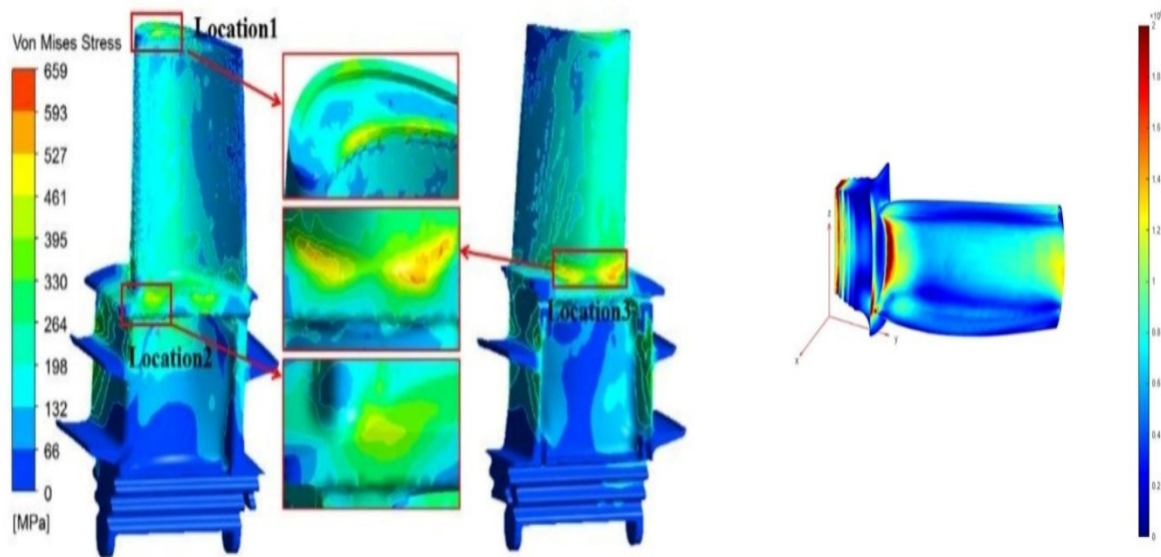


Figure 2.3 : Distribution des contraintes (Von Mises) dans une ailette de turbine.

2.2. Numérisation 3D

2.2.1. Préparation de la pièce

La numérisation 3D est une technologie de puissante utilisée par les ingénieurs pour créer des modèles numériques précis dans des secteurs tels que la fabrication et la conception. Une préparation minutieuse de l'objet à numériser est essentielle pour garantir des résultats de haute qualité, éviter les erreurs et minimiser le temps de traitement, Voici les étapes de préparation de la pièce : [16]

Étape 1 : Évaluer l'objet à scanner

Avant de commencer, examinez attentivement l'objet que vous souhaitez scanner. Prenez en compte :

- **Taille et forme :** Est-ce un petit composant ou une grande structure ?
- **Matériaux :** Les surfaces réfléchissantes (métal, verre) ou transparentes nécessitent un traitement spécial.
- **Complexité :** Les zones avec des cavités, des détails fins ou des angles difficiles peuvent nécessiter des ajustements.

Étape 2 : Nettoyer l'objet

Un objet propre est crucial pour un scan précis. Toute poussière, saleté ou résidu peut interférer avec la capture des données. Voici comment procéder :

- Utilisez un **chiffon doux** ou une **brosse non abrasive** pour enlever la poussière ou les débris.
- Pour les taches tenaces, utilisez un nettoyant doux adapté au matériau (évitez les produits chimiques agressifs).
- Assurez-vous que l'objet est complètement sec avant le scan.

Une surface propre garantit que le scanner capture uniquement les détails pertinents de l'objet.

Étape 3 : Choisir un environnement adapté

L'environnement dans lequel l'objet est scanné joue un rôle clé dans la qualité du résultat. Suivez ces recommandations :

- **Éclairage** : Utilisez un éclairage uniforme, sans reflets ni ombres. Évitez la lumière directe du soleil.
- **Arrière-plan** : Placez l'objet sur une surface neutre (non réfléchissante) pour éviter les interférences.
- **Espace** : Assurez-vous que le scanner peut accéder à toutes les faces de l'objet sans obstruction.

Étape 4 : Vérifier la stabilité de l'objet

Un objet qui bouge pendant le scan peut entraîner des erreurs dans le modèle 3D. Pour éviter cela :

- Placez l'objet sur une **plateforme stable** ou un support adapté.
- Si l'objet est léger ou instable, utilisez des fixations non invasives (ex. : ruban adhésif double face).
- Vérifiez que l'objet ne risque pas de basculer ou de vibrer pendant le processus.

Une bonne stabilité garantit que le scan capture chaque détail avec précision.

2.2.2 Acquisition (scanner 3D)

Les techniques d'acquisition 3D peuvent être classées en deux grandes catégories : actives et passives. Dans les systèmes actifs, une source externe projette de l'énergie sur la scène d'intérêt afin de mesurer les données de surface. La lumière structurée et les détecteurs laser sont deux exemples de systèmes actifs. [17]

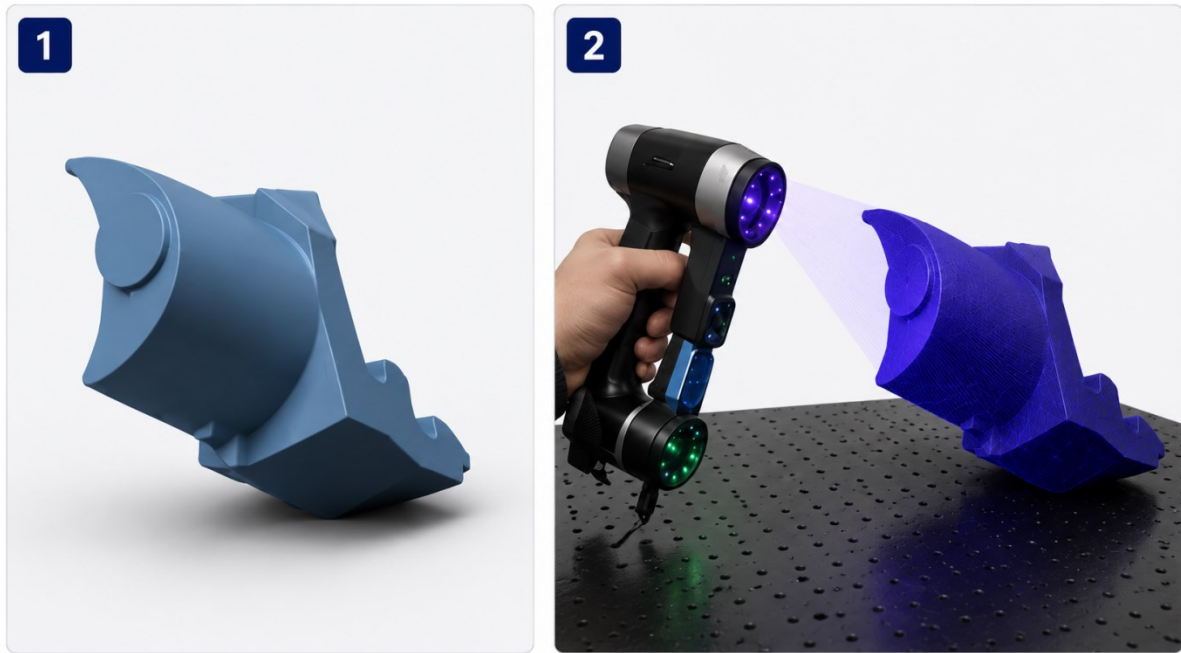


Figure 2.4 : Acquisition des données géométriques par scanner 3D portable.

Dans les systèmes de numérisation passifs, aucune source d'énergie n'est projetée sur l'objet ou la scène à analyser. Parmi ces techniques, la stéréovision est l'une des plus répandues. Elle repose sur l'acquisition simultanée de plusieurs images prises sous différents points de vue afin de reconstruire la géométrie tridimensionnelle de l'objet observé.

Par rapport aux méthodes actives, la stéréovision présente plusieurs avantages, notamment une moindre sensibilité aux variations d'éclairage ambiant ainsi qu'une architecture matérielle plus légère, puisqu'elle ne nécessite pas de dispositif de projection. Ces caractéristiques la rendent particulièrement adaptée aux applications embarquées et aux systèmes de vision mobiles.

Cependant, cette technique est confrontée au problème complexe de la mise en correspondance des points homologues entre les différentes images. Cette étape peut être fortement perturbée par la présence de motifs répétitifs, de zones peu texturées ou d'occlusions, ce qui peut dégrader la qualité de la reconstruction tridimensionnelle.

Pour cette raison, le système d'acquisition retenu dans ce travail repose sur la technique de la lumière structurée. Cette approche active permet d'obtenir des nuages de points plus denses et plus précis, favorisant ainsi la reconstruction de modèles tridimensionnels de haute qualité. De plus, l'influence de l'éclairage ambiant reste limitée dans notre cas, puisque les acquisitions sont réalisées dans un environnement contrôlé [17]

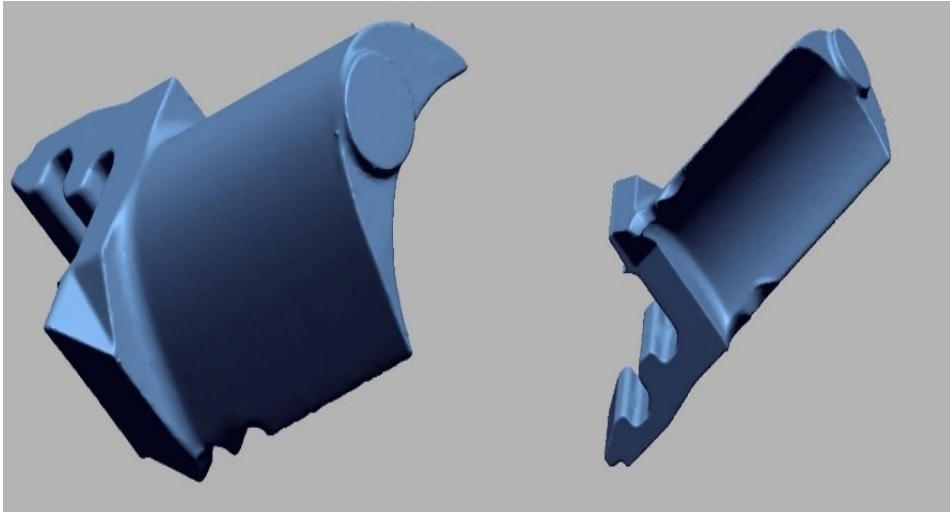


Figure 2.5 : ailette de turbine capturée par le système d'acquisition.

2.2.3. Traitement du nuage de points

Comme son nom l'indique, un nuage de points est un ensemble de points. Chaque point indique un endroit où la surface de l'objet représenté existe. L'information est donc stockée par la position relative de chaque point les uns par rapport aux autres. Elle peut être, dans certains cas, associée à une couleur pour chaque point ou une normale, représentant la direction de la surface au niveau du point. [18]

La figure 2.6 montre un exemple de nuage de points représentant une ailette de turbine

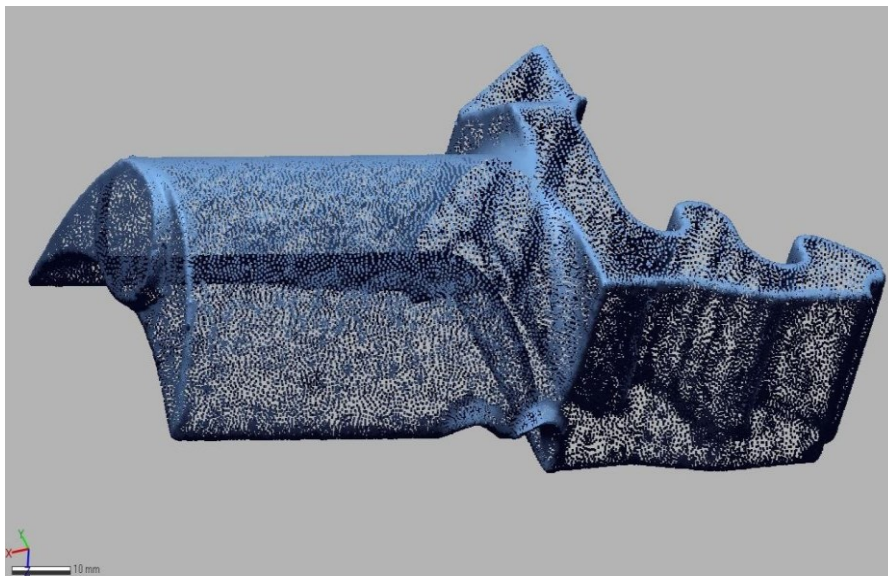


Figure 2.6 : nuage de points représentant une ailette de turbine

Propriétés Un nuage de points ne contenant que des points, cette représentation a l'avantage d'être très simple à stocker et afficher. Le problème principal vient que la surface représentée est inconnue ; en effet, comment savoir si deux points appartiennent à la même surface ? Cela rend difficile le calcul des normales par exemple, qui sont utiles pour la segmentation, entre autres. Un autre problème concerne le rendu du nuage de points, car si le nombre de points est faible, des trous seront visibles. La figure 2.7 montre bien que la surface est parfaitement représentée lorsqu'il y a assez de points, mais que des trous sont visibles. [18]

Cela peut être compensé par plusieurs algorithmes de rendu qui permettent d'afficher un nuage de points de manière à observer l'objet représenté de manière très réaliste. Par exemple Gois et al. 2006 utilisent un opérateur de projection basé sur la courbure, la normale et une équation de diffusion anisotrope afin de créer une surface lors de la visualisation, créant une image comme celle visible sur la figure 2.7. Les différences avec un maillage ne sont pas visibles. Cependant, si le but est d'afficher les points, ceux étant à l'arrière du modèle deviennent visibles (figure 2.2a). Il devient donc difficile de comprendre ce qui est affiché, car il n'est pas possible de discerner quels sont les points devant ou derrière. Une solution est de les colorer selon leur distance, ce qui permet d'améliorer légèrement la compréhension. Une autre solution est de cacher les points qui ne seraient pas visibles si la surface existait. [18]

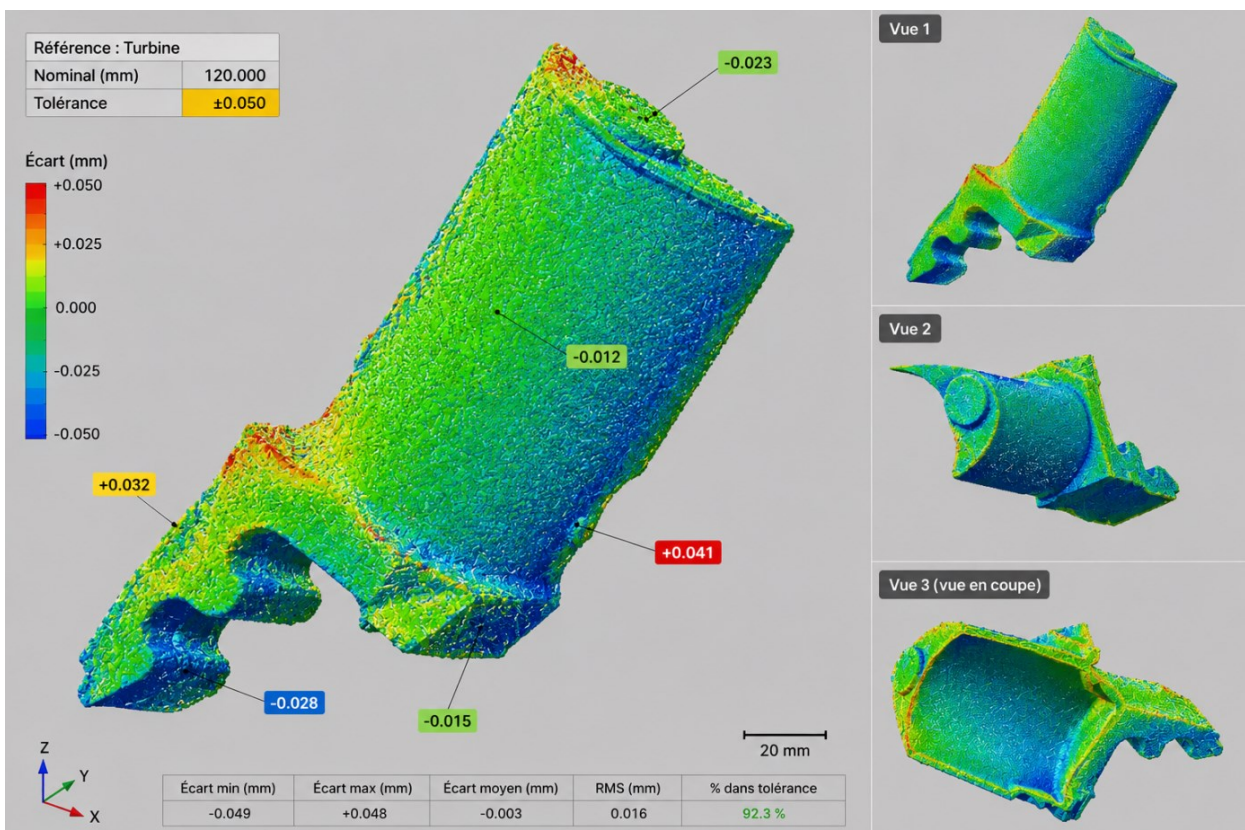


Figure 2.7 : Nuage de points et analyse des déviations géométriques de la pièce numérisée.

2.3. Reconstruction CAO

2.3.1. Organisation des surfaces / volumes

La reconstruction de surface consiste à créer une enveloppe externe lisse de l'objet à partir de données de nuage de points, tandis que la modélisation volumique crée une représentation volumique. Les modèles de surface sont utiles pour la visualisation de la conception, tandis que les modèles volumiques sont utilisés dans l'analyse par éléments finis et la fabrication. Ensemble, ils forment une réplique numérique complète du produit original. La reconstruction de modèles de surface et volumique constitue une technologie fondamentale, transformant fondamentalement la manière dont les objets et les environnements physiques sont traduits en représentations numériques tridimensionnelles précises et manipulables pour diverses applications. Ce processus sophistiqué commence généralement par l'acquisition de données, utilisant des outils avancés tels que des scanners laser, des systèmes de lumière structurée, la photogrammétrie ou des modalités d'imagerie médicale comme la tomodensitométrie (TDM) et l'imagerie par résonance magnétique (IRM), générant des nuages de points denses ou des ensembles de données volumiques de l'entité réelle. La reconstruction de surface prend ensuite ces points de données discrets, souvent bruités, et les interpole intelligemment en un maillage continu et étanche, généralement composé de triangles ou de quadrilatères interconnectés, créant ainsi une « peau » numérique qui représente fidèlement la forme extérieure de l'objet. Des algorithmes complexes comme la triangulation de Delaunay, la méthode des cubes en marche et la reconstruction de Poisson sont essentiels pour surmonter les difficultés liées au bruit, aux données incomplètes et à la préservation des détails, garantissant ainsi un maillage topologiquement correct et géométriquement fidèle pour la visualisation et la rétro-ingénierie. S'appuyant sur cette étape fondamentale, la reconstruction de modèles solides va au-delà de la simple définition de l'extérieur, visant à créer une représentation complète et nuancée qui englobe le volume interne et les propriétés des matériaux de l'objet. Cela implique la conversion du maillage de surface généré en un véritable modèle solide, souvent à l'aide de techniques telles que la représentation de frontière (B-rep), la géométrie constructive des solides (CSG) ou les représentations voxelisées, qui définissent l'objet comme un volume rempli, et non comme une simple enveloppe vide. La distinction entre modèles de surface et modèles solides est primordiale : si les modèles de surface excellent dans la visualisation et la conception externe, les modèles solides sont indispensables pour les tâches exigeant la simulation physique, l'analyse et la fabrication. Par

exemple, l'analyse par éléments finis (FEA), la fabrication assistée par ordinateur (FAO) et l'impression 3D avancée requièrent l'intégrité volumétrique et la définition des propriétés des matériaux que seul un modèle solide peut fournir, permettant ainsi aux ingénieurs de prédire les performances et d'optimiser les conceptions. Ensemble, ces puissantes méthodologies de reconstruction sont essentielles pour combler le fossé entre le tangible et le numérique, stimulant l'innovation dans l'ingénierie, la médecine et le design industriel en permettant la création de jumeaux numériques précis du monde physique. [18]

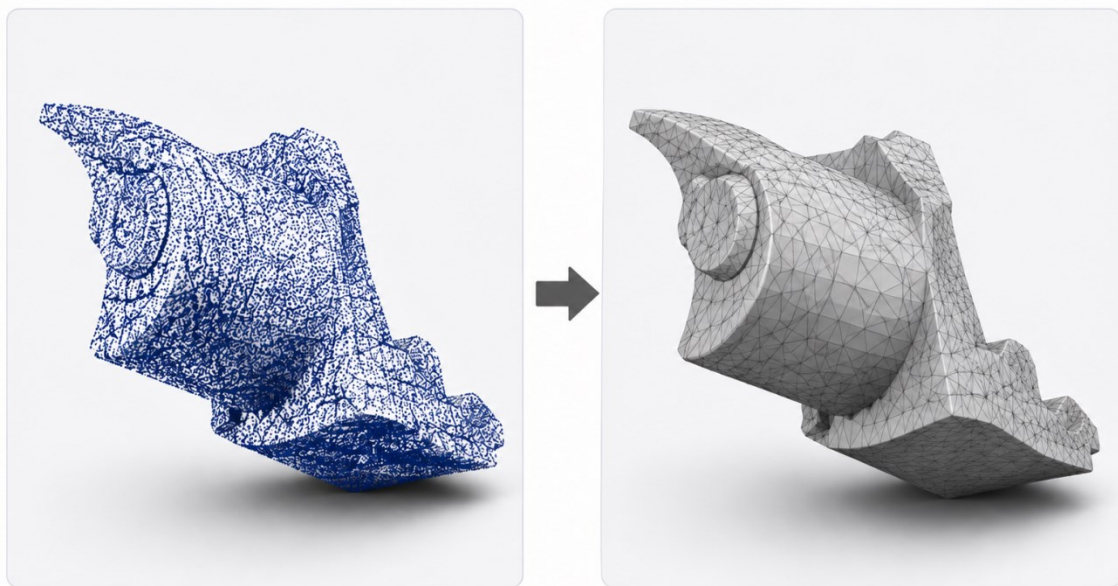


Figure 2.8 : Surface Reconstruction

2.3.2. Génération du modèle paramétrique

La modélisation paramétrique est une approche de conception assistée par ordinateur (CAO) qui utilise des paramètres variables et des relations entre éléments pour définir un modèle 3D. Contrairement aux méthodes de modélisation traditionnelles où chaque modification nécessite de redessiner manuellement les éléments, la modélisation paramétrique permet de mettre à jour l'ensemble du modèle en modifiant simplement quelques valeurs. [19]

Le principe fondamental repose sur la création de relations intelligentes entre les différentes parties d'un modèle. Par exemple, si vous concevez une table, vous pouvez établir une relation où la hauteur des pieds détermine automatiquement la hauteur du plateau. Ainsi, en changeant un seul paramètre (la hauteur des pieds), l'ensemble de la table s'ajuste harmonieusement. [19]

Cette approche offre plusieurs avantages majeurs :

- **Flexibilité de conception** : modifiez rapidement vos designs sans tout reconstruire
- **Cohérence garantie** : les relations entre éléments maintiennent l'intégrité du modèle

- **Exploration facilitée** : testez différentes variations en ajustant simplement quelques paramètres
- **Gain de temps considérable** : évitez de reprendre le travail à zéro lors des révisions

La différence avec la modélisation directe :

Modélisation paramétrique :

- Basée sur l'historique des opérations
- Modifications rapides via paramètres
- Capture l'intention de conception
- Idéale pour les designs techniques
- Modifications complexes facilitées

Modélisation directe :

- Manipulation directe sans historique
- Modifications manuelles de la géométrie
- Se concentre sur la forme finale
- Adaptée aux formes organiques libres
- Modifications simples plus intuitives

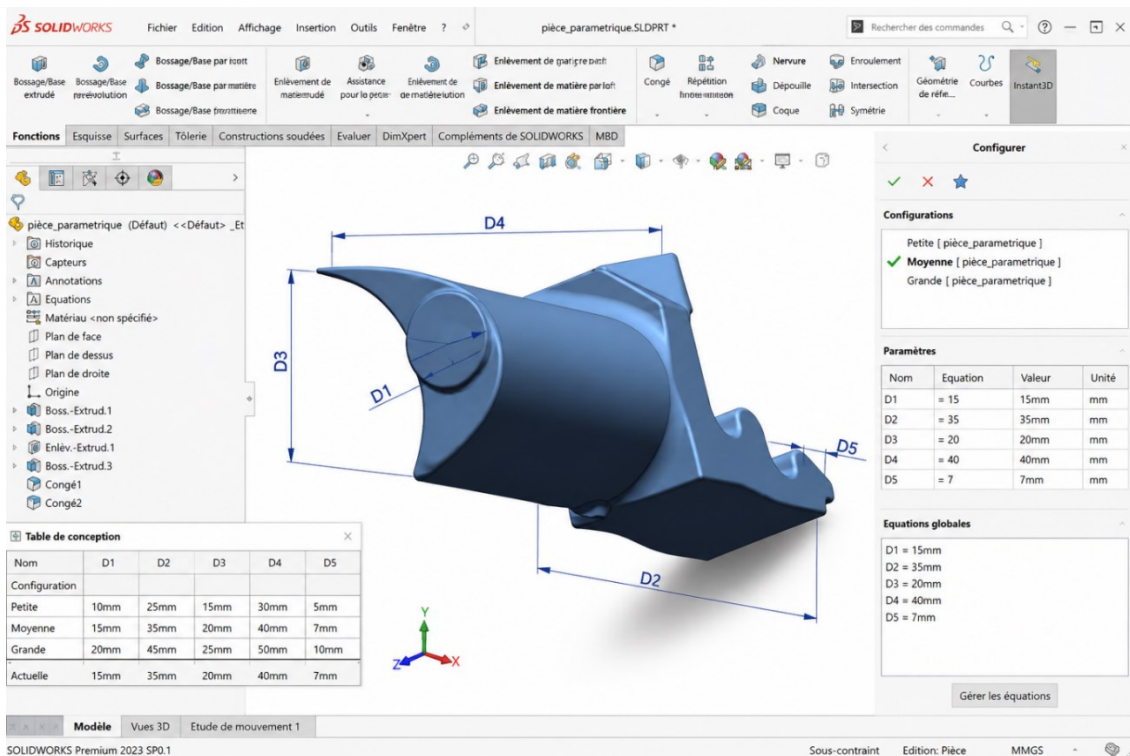


Figure 2.9 : Conception paramétrique de structures dans SolidWorks

2.3.3. Validation par superposition avec la pièce réelle

La validation par superposition est une étape fondamentale dans le processus de rétroconception et de contrôle géométrique. Elle consiste à comparer le modèle numérique

reconstruit (modèle CAO) avec la pièce réelle numérisée par un scanner 3D afin d'évaluer le niveau de conformité entre les deux géométries. [20]

Après l'acquisition des données tridimensionnelles de la pièce réelle, un nuage de points ou un maillage polygonal est obtenu. Ce fichier est ensuite importé dans un logiciel de métrologie 3D où il est superposé au modèle CAO conçu lors de la phase de reconstruction. Avant la comparaison, une opération d'alignement est réalisée pour positionner correctement les deux modèles dans le même repère spatial. Cette étape peut être effectuée par alignement manuel, par références géométriques ou par la méthode du "best fit".

Une fois la superposition effectuée, le logiciel calcule automatiquement les écarts dimensionnels entre la surface réelle et la surface théorique du modèle CAO. Les résultats sont généralement représentés sous forme de cartographie colorimétrique (Fig. 2.10) :

- Le vert indique les zones conformes,
- Le rouge représente les excès de matière,
- Le bleu montre les zones présentant un manque de matière ou des déformations.

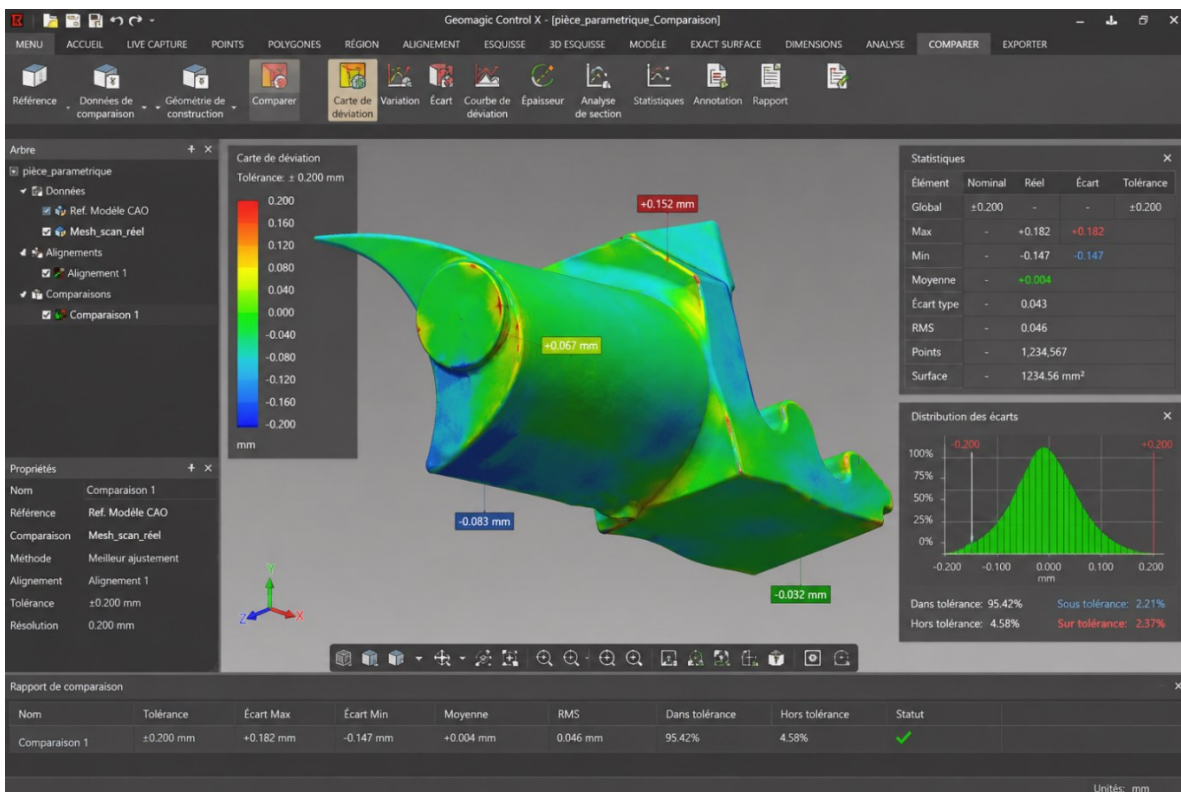


Figure 2.10 : Contrôle des écarts dimensionnels après superposition du modèle réel et du modèle numérique.

Cette analyse permet d'identifier avec précision :

- Les défauts géométriques,
- Les variations d'épaisseur,
- Les déformations locales,
- Les erreurs de reconstruction,
- Ainsi que les zones critiques soumises à des contraintes mécaniques importantes.

La validation par superposition joue un rôle essentiel dans l'assurance qualité, car elle permet de vérifier la précision du modèle reconstruit et de garantir que la pièce respecte les tolérances dimensionnelles exigées. Elle est largement utilisée dans les domaines de l'aéronautique, de l'automobile, de la fabrication mécanique et de la maintenance industrielle, notamment pour les pièces complexes telles que les aubes de turbine, les moules ou les composants mécaniques usés.

Les logiciels les plus utilisés pour ce type d'analyse sont :

- Geomagic Control X
- PolyWorks
- CATIA
- GOM Inspect

2.4. Analyse des défauts

2.4.1. Zones critiques : concentrations de contraintes, variations d'épaisseurs

Pour cette ailette de turbine, les zones critiques représentent les régions les plus sollicitées mécaniquement et thermiquement durant le fonctionnement. En raison des hautes vitesses de rotation et des températures élevées, l'ailette est soumise à des efforts complexes pouvant entraîner des phénomènes de fatigue, de déformation ou de rupture.

Les concentrations de contraintes apparaissent principalement :

- Au niveau du pied de l'ailette, où les efforts centrifuges sont très importants ;
- Dans les zones de raccordement entre le profil et l'embase ;
- Sur les bords d'attaque et de fuite, fortement exposés aux contraintes thermiques et à l'érosion ;
- Ainsi qu'aux changements brusques de section ou de courbure.

Les variations d'épaisseur constituent également un paramètre critique. Une diminution locale d'épaisseur peut réduire la résistance mécanique et accélérer l'apparition de fissures, tandis qu'une surépaisseur peut modifier l'équilibrage dynamique et les performances aérodynamiques de la turbine. Ces variations peuvent être causées par :

- L'usure,
- La corrosion,

- Les hautes températures,
- Ou les défauts de fabrication.

L'analyse de ces défauts est généralement réalisée par superposition 3D, cartographie colorimétrique et simulation numérique par éléments finis afin d'identifier les zones sensibles et garantir la fiabilité de l'ailette avant sa remise en service ou sa reproduction. [21]

2.4.2 Limitations géométriques identifiées

Si personne n'est parfait, même le scanner laser 3D, dans certaines situations, présente des limites. La déviation de l'exactitude d'un scan peut être :

- L'humidité ou la lumière excessive d'un environnement
- Le relevé des espaces exposés au mouvement des choses ou des personnes
- Le relevé d'objets particulièrement complexes et riches en géométries cachées
- Le relevé de structures hautement réfléchissantes

Cependant, tous ces problèmes peuvent être atténués de manière assez simple :

- En utilisant le scanner laser à des moments de la journée peu humides ou peu lumineux et des moments de circulation réduite
- En nettoyant les points lors de l'acquisition
- En développant des scans sous différents angles de l'objet pour obtenir un modèle complet.

2.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, une démarche complète de rétroconception appliquée à une ailette de turbine a été présentée. Après l'analyse fonctionnelle et mécanique de la pièce, les différentes étapes de préparation et de numérisation 3D ont été détaillées afin d'obtenir un nuage de points précis représentant la géométrie réelle de la pièce.

Le traitement des données acquises a permis la reconstruction d'un modèle CAO paramétrique exploitable pour les opérations de validation et d'analyse. La superposition entre le modèle numérique et la pièce réelle a permis d'identifier les écarts géométriques ainsi que les zones critiques soumises aux contraintes mécaniques et thermiques.

Les résultats obtenus démontrent l'importance des technologies de rétroconception dans la reproduction et l'optimisation des composants industriels complexes.

Chapitre 3

Partie expérimentale (Fabrication d'ailette de turbine)

3.1. Choix du procédé de fabrication

3.1.1. Impression 3D

L'impression 3D ou la fabrication additive est un processus de fabrication d'objets solides tridimensionnels à partir d'un fichier numérique. L'objet imprimé en 3D est créé en superposant des couches de matériaux. Chacune de ces couches peut être considérée comme une coupe transversale horizontale mince de l'objet temporaire.

Ce procédé s'appelle aussi processus additif. L'impression 3D est l'opposé de la fabrication soustractive qui coupe ou creuse un morceau de métal ou de plastique avec des machines conventionnelles (voir la Figure 3.1). Elle permet de créer des formes complexes (fonctionnelles) en utilisant moins de matériaux que les procédés de fabrication traditionnelles. Elle est définie par l'ASTM comme un processus de fabrication additive (ou additive manufacturing, AM) consistant à « assembler des matériaux pour fabriquer des objets à partir de données de modèles 3D, généralement couche après couche ». C'est donc un processus automatisé consistant à réaliser des objets conçus en 3D avec un logiciel de CAO, en les imprimant couches par couches, de bas en haut.



Figure 3.1 : Imprimante 3D

La pièce à étudier :

Au sein de cette section expérimentale, nous allons étudier une pièce à la forme complexe et endommagée comme nous l'avons dit dans le chapitre précédent. Cette pièce est une ailette de turbine mobile, la méthodologie adoptée pour cette étude consiste en la réalisation des étapes suivantes : numérisation 3D, traitement de nuages de points, reconstruction, vérification de la conformité, et création d'un prototype par impression 3D.



Figure 3.2: la pièce à étudier (ailette turbine mobile)

3.1.2. Equipements utilisés :

Les équipements utilisés dans notre étude font partie des technologies les plus récentes, qu'elles soient matérielles (telles que le scanner 3D et imprimante 3d) ou immatérielles (comme les logiciels), comme indiqué ci-dessous :

Scanner 3D :

Revopoint MIRACO Plus un scanner 3D portable et autonome utilisé dans les applications de rétroconception et de contrôle dimensionnel. Il fonctionne avec la technologie de lumière

structurée infrarouge et offre une précision pouvant atteindre 0,04 mm, avec une vitesse de numérisation allant jusqu'à 20 images par seconde.



Figure 3.3: Scanner Revopoint MIRACO PLUS

Caractéristique :

- Précision par image unique (Single-frame Accuracy) : jusqu'à 0,05 mm.
- Distance fusionnée entre les points (Fused Point Distance) : jusqu'à 0,05 mm.
- Zone de capture unique à la distance minimale :
28 × 53 mm à une distance de 100 mm.

- Zone de capture unique à la distance maximale :

975 × 775 mm à une distance de 1000 mm

- Modes de capture disponibles :

Mode capture unique (Single-shot Mode)

Mode capture continu (Continuos Capture Mode)

- Vitesse de numérisation (Scanning Speed) :

Jusqu'à 15 images par seconde (15 fps).

- Volume minimal de numérisation :

10 × 10 × 10 mm.

- Volume maximal de numérisation :

4 × 4 × 4 m.

- Distance de travail (Working Distance):

Comprise entre 100 mm et 1000 mm.

Logiciel de traitement :

➤ Geomagic design X version 2022

Geomagic design X est un logiciel de rétroconception (reverse engineering) qui permet de transformer des données de numérisation 3D (maillage ou nuage de points) en modèles CAO paramétriques modifiables. Il est utilisé pour reconstruire des pièces physiques en modèles numériques précis afin de faciliter la conception, la fabrication et l'inspection industrielle.

➤ Geomagic contrôle X version 2022

Geomagic Control X est un logiciel de contrôle dimensionnel pour les pièces manufacturées. Il permet d'analyser les défauts de pièces et de comparer les résultats d'inspection avec les spécifications de conception pour assurer la qualité des produits.

3.1.3. Processus de travail :

Le schéma de la figure 3.4 présente de manière explicative les différentes étapes suivies lors du processus de rétro-conception de notre pièce.



Figure 3.4: Processus de travail

Phase de numérisation 3D :

La première étape consiste à préparer le stand de numérisation (Figure 3.5) et la pièce à étudier en suivant les étapes suivantes :

- Nettoyer l'endroit de numérisation.
- Nettoyer la pièce à l'aide d'un chiffon propre et d'un solvant.
- Placer les cibles sur la pièce et sur la table rotative.
- Protéger l'endroit contre les lumières externes.

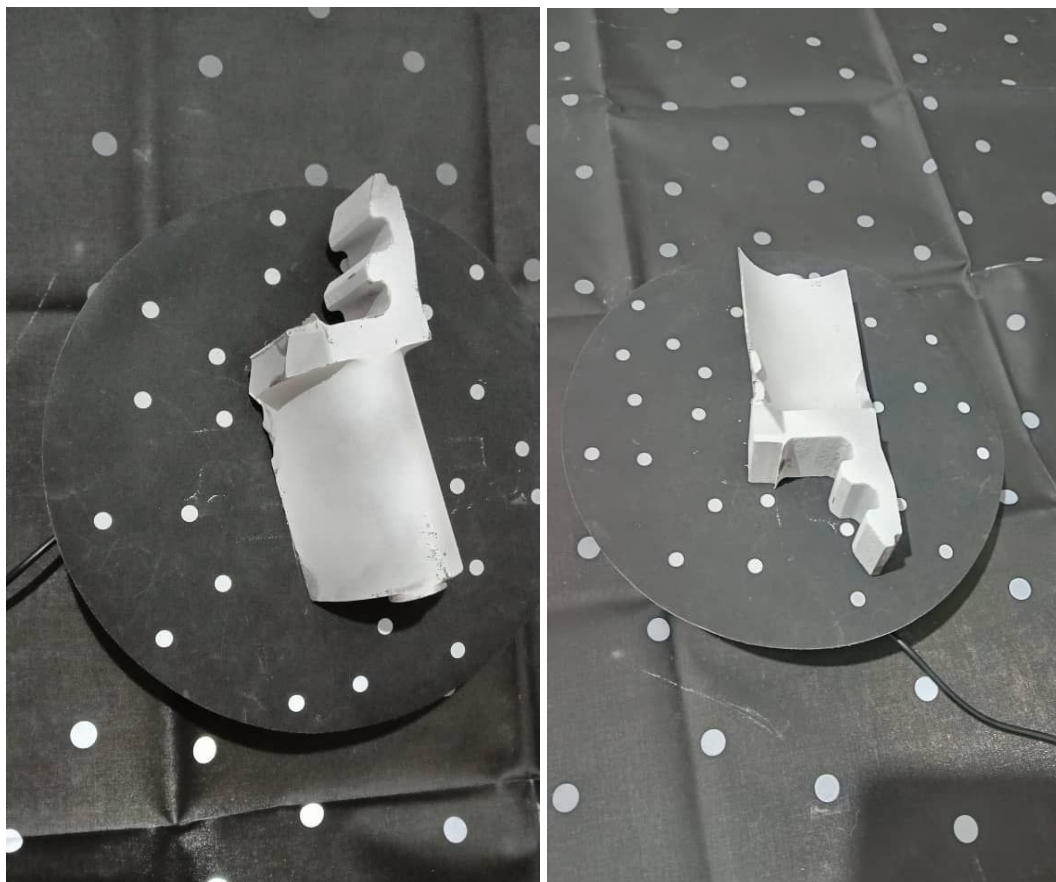


Figure 3.5 : Préparation de l'endroit et de la pièce

Opération de numérisation :

L'opération de numérisation a été réalisée sur une ailette mobile légère C'est pourquoi nous avons apporté un petit scanner comme Revopoint MIRACO Plus (Figure 3.6) .



Figure 3.6 : La numérisation

- Méthodologie suivie :

La méthodologie suivie est résumée dans l'algorithme de numérisation 3D, qui est présenté sous forme d'organigramme ci-dessous (Figure 3.7).

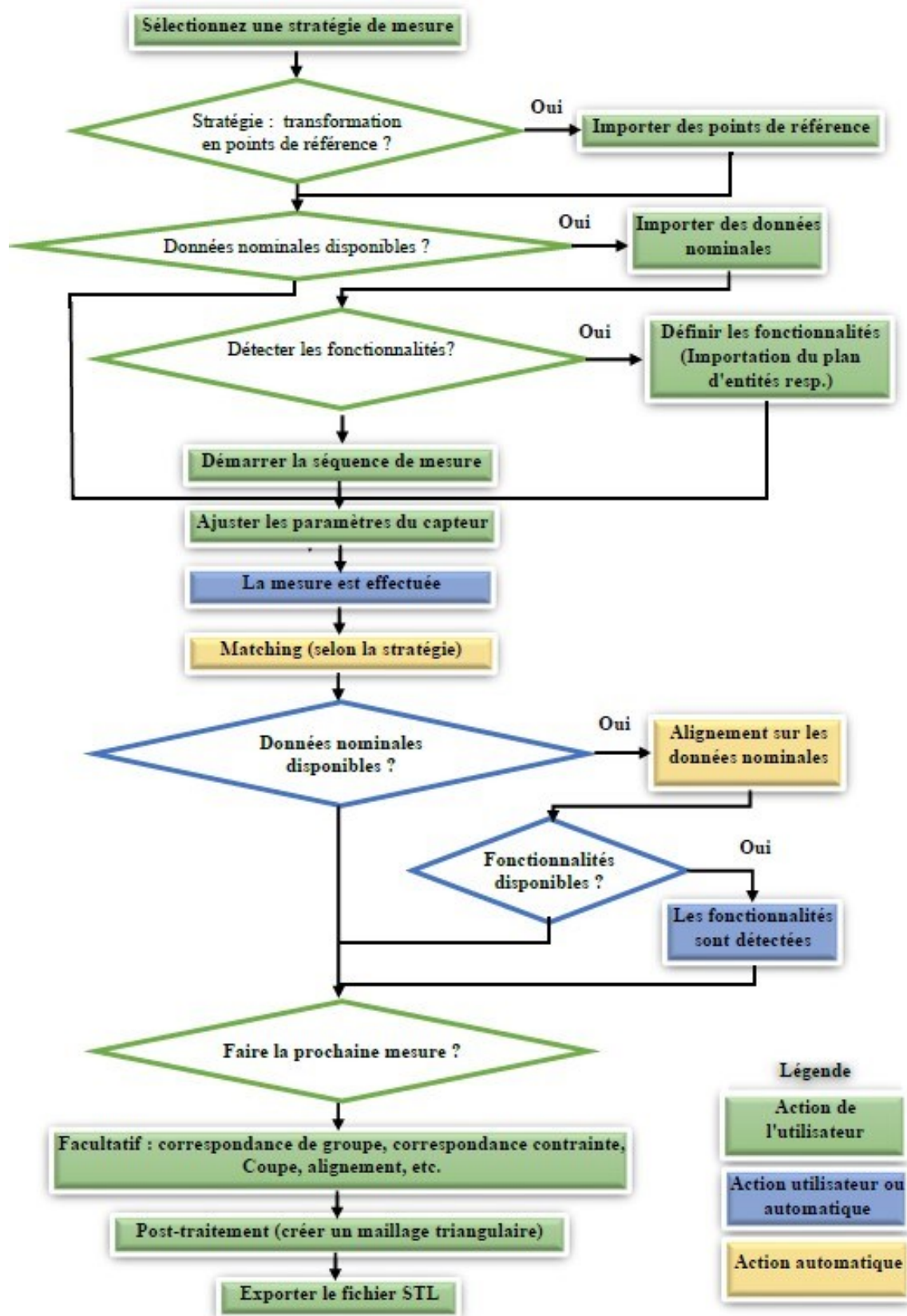


Figure 3.7 : Organigramme de la méthodologie suivie

Traitement avec MIRACO plus :

Afin d'obtenir un résultat satisfaisant, nous devons procéder à l'étalonnage du système avant de commencer le processus de numérisation en utilisant la méthodologie de l'algorithme de numérisation 3D.

La formation de nuages de points est obtenue en suivant les étapes présentées dans la Figure 3.8

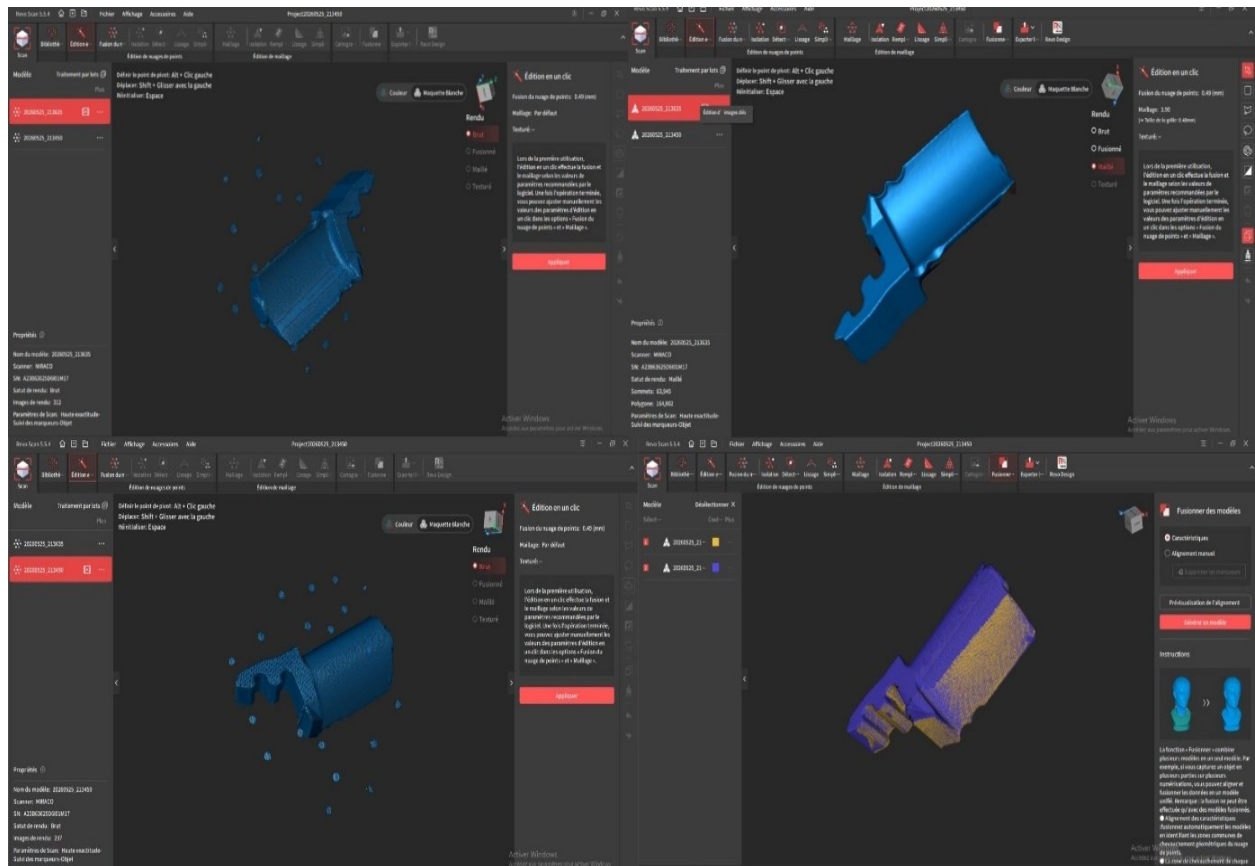


Figure 3.8 : Formation de nuages de points

Phase de traitements avec logiciel Geomagic design X :

Cette phase consiste à importer les données du nuage de points format STL, à réduire le bruit dans les données collectées, remplir les trous et à réduire le nombre de points.

-Méthodologie algorithme de travail GEOMAGIC Design X :

La méthodologie d'algorithme de travail Geomagic se concentre sur l'utilisation des outils et des fonctionnalités du logiciel pour optimiser le processus de modélisation 3D. Cette méthodologie commence par l'acquisition de données à l'aide d'un scanner 3D ou d'autres technologies de numérisation, puis utilise des outils Geomagic pour convertir ces données en

modèles 3D. Les étapes suivantes incluent la création de surfaces, la réparation de modèles, l'ajout de fonctionnalités spécifiques et la préparation du modèle pour la production. Pour une meilleure compréhension, nous avons résumé ce qui précède dans le graphique suivant:

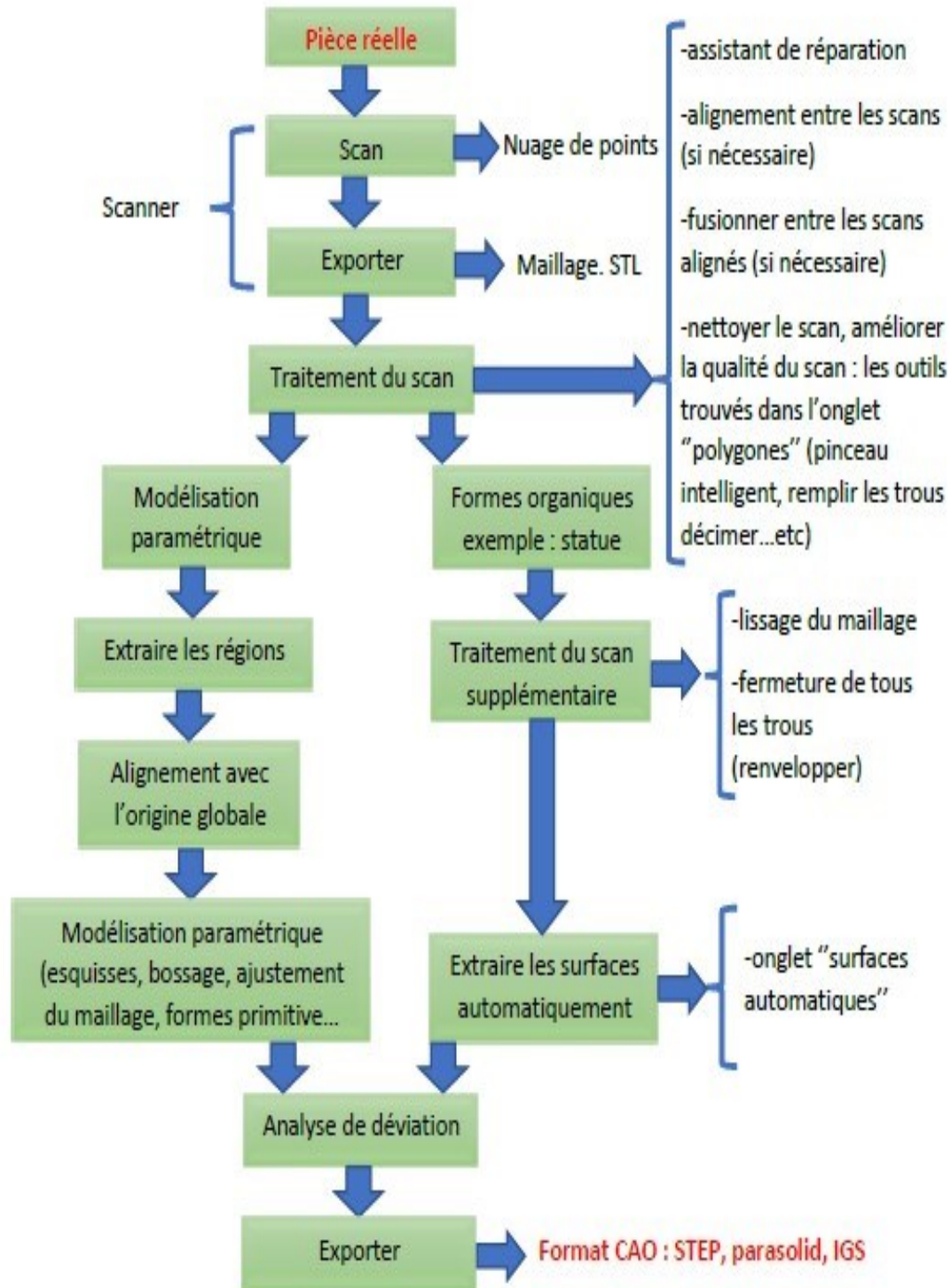


Figure 3.9 : Organigramme explicatif de la méthodologie de travail par GEOMAGIC

- Importation du nuage de points dans GEOMAGIC Design X :

La Figure 3.10 illustre l'importation de nuage de points dans GEOMAGIC Design X sur format STL.

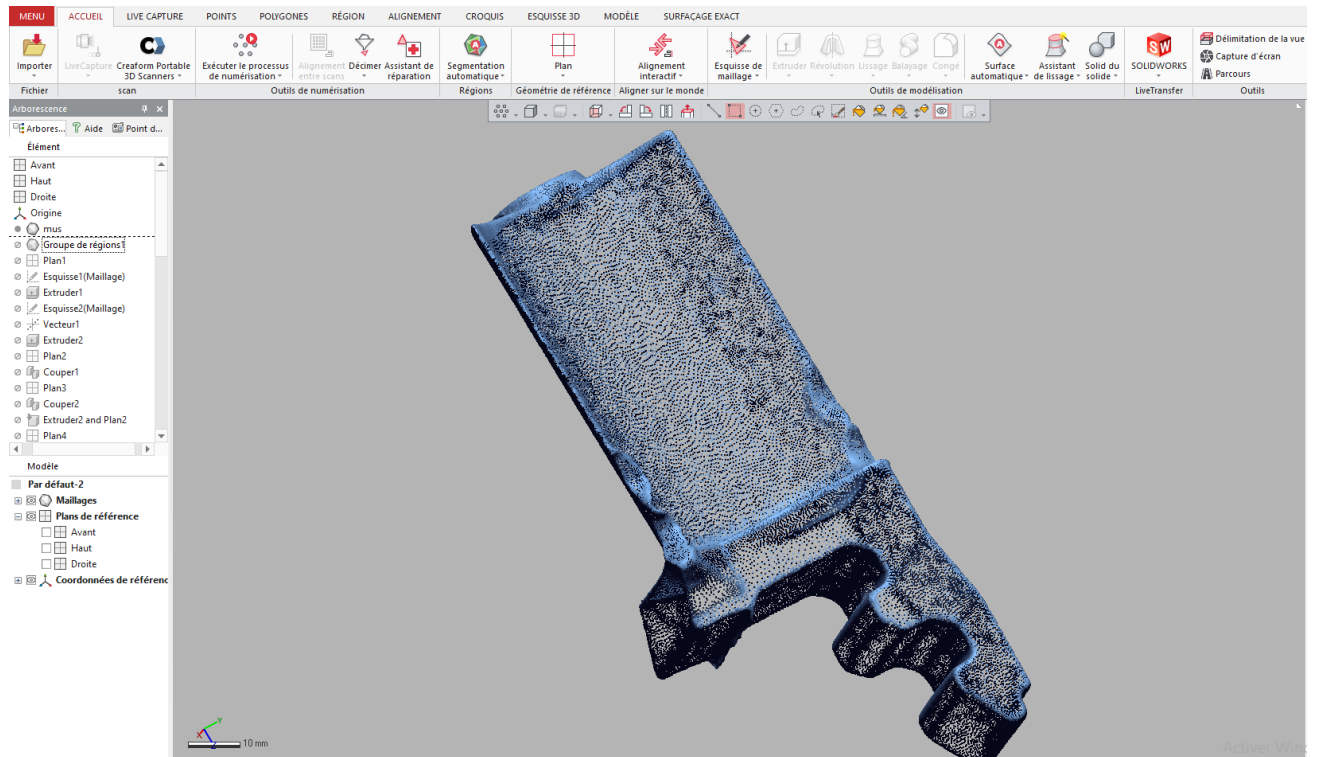


Figure 3.10 : Importation du nuage de points format STL dans Geomagic Design X

Traitement du scan :

Selon GEOMAGIC Design X, la première étape est le traitement du scan trouvé dans l'onglet polygones (Figure 3.11).

- Assistant de réparation
- Nettoyer le scan, améliorer la qualité du scan : pinceau intelligent, remplir les trous décimer ...etc.)
- Lissage du maillage

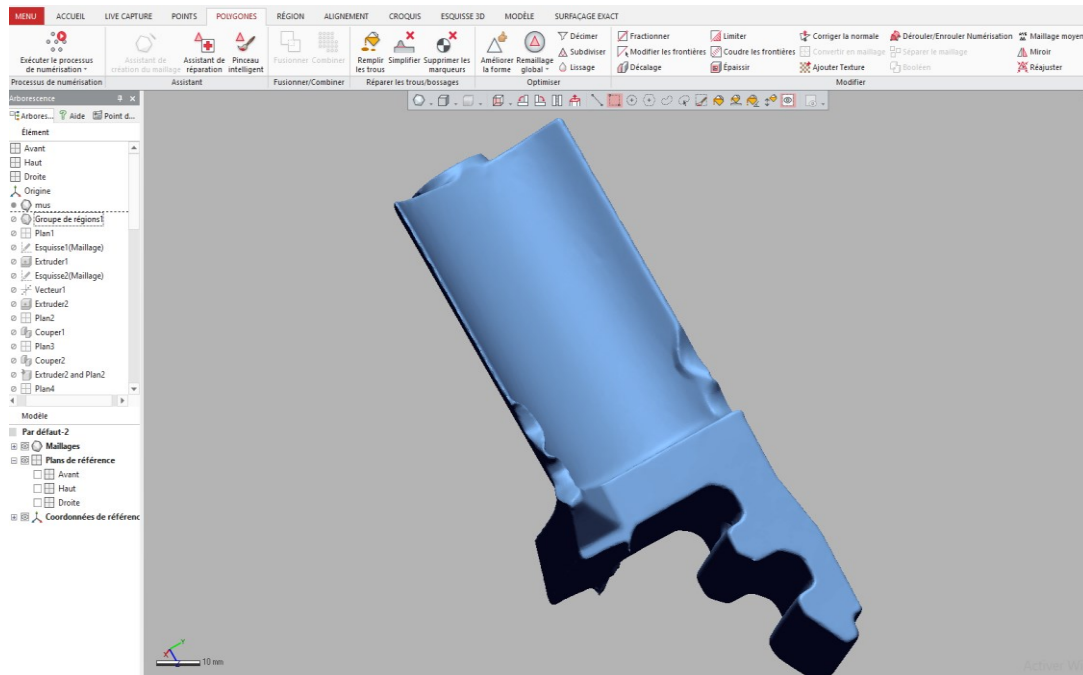


Figure 3.11: Traitement du scan

- Reconstruction de la pièce :

Dans l'onglet région : extraire les régions par segmentation automatique (Figure V.12) cette technique peu détectée automatiquement les surfaces (cylindre, cône, plan...)

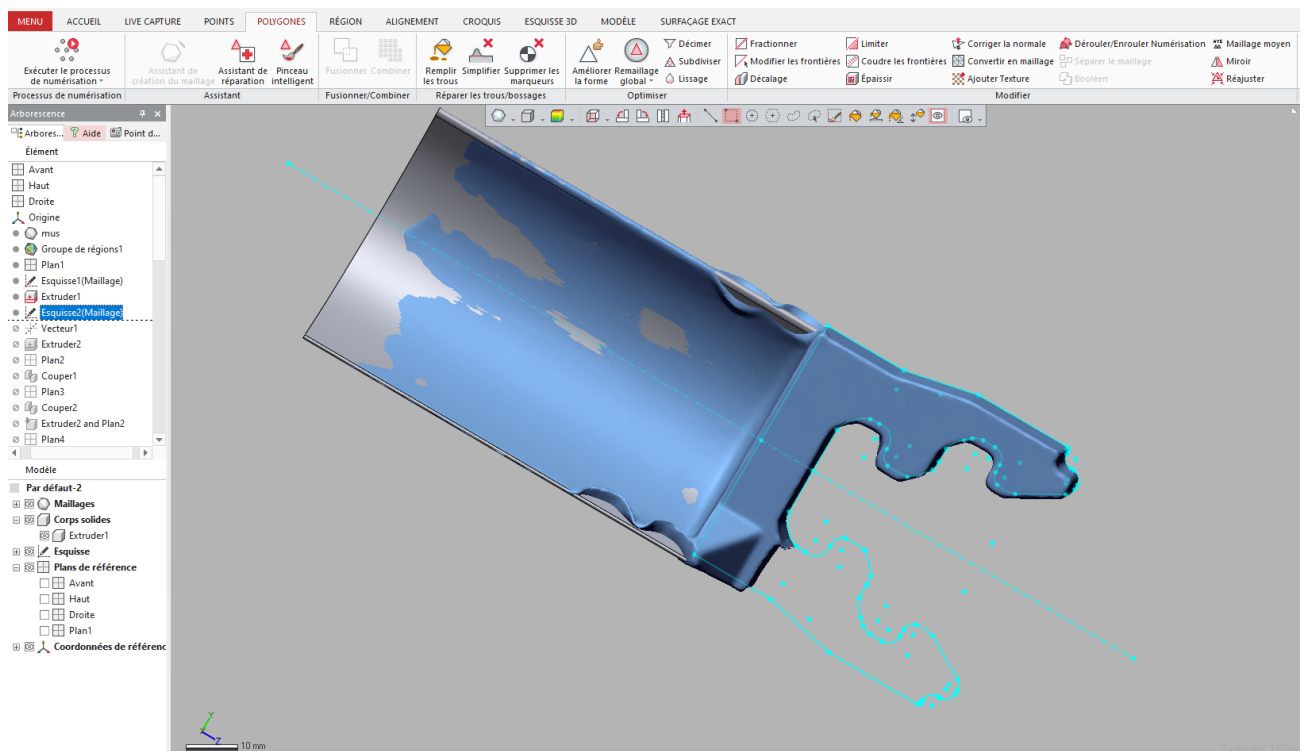


Figure 3.12: Extraire les régions

Une partie détériorée de la pièce a été restaurée (Figure 3.13) numériquement sous Geomagic afin de reconstituer sa géométrie initiale.

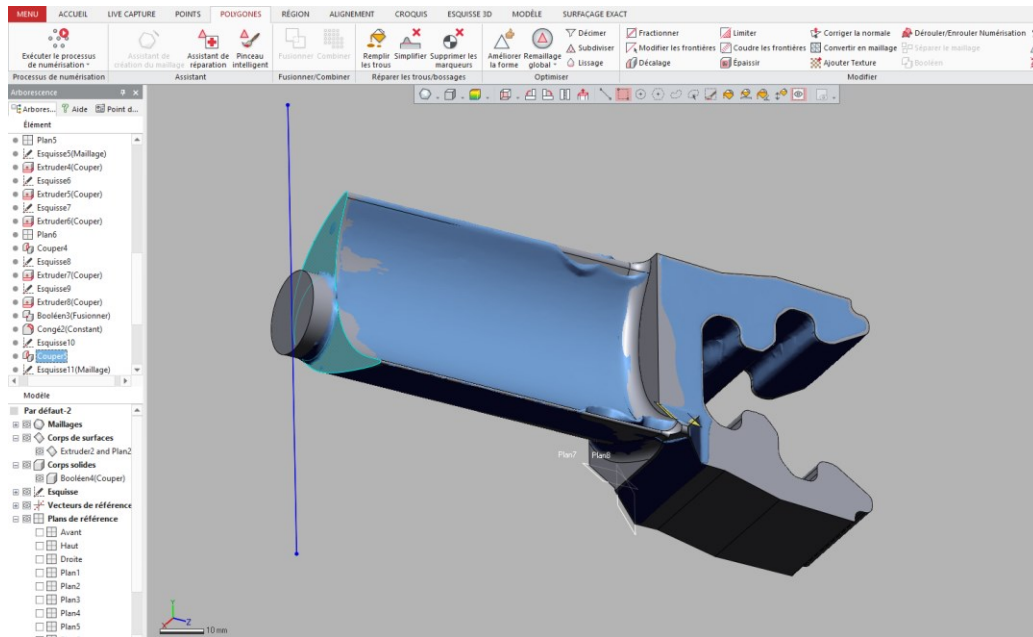


Figure 3.13 : La pièce restaurée

La pièce finale a été obtenue après reconstruction et correction des zones endommagées sous Geomagic, permettant de retrouver une géométrie conforme au modèle initial voir le model CAO sur SolidWorks dans la figure 3.14.

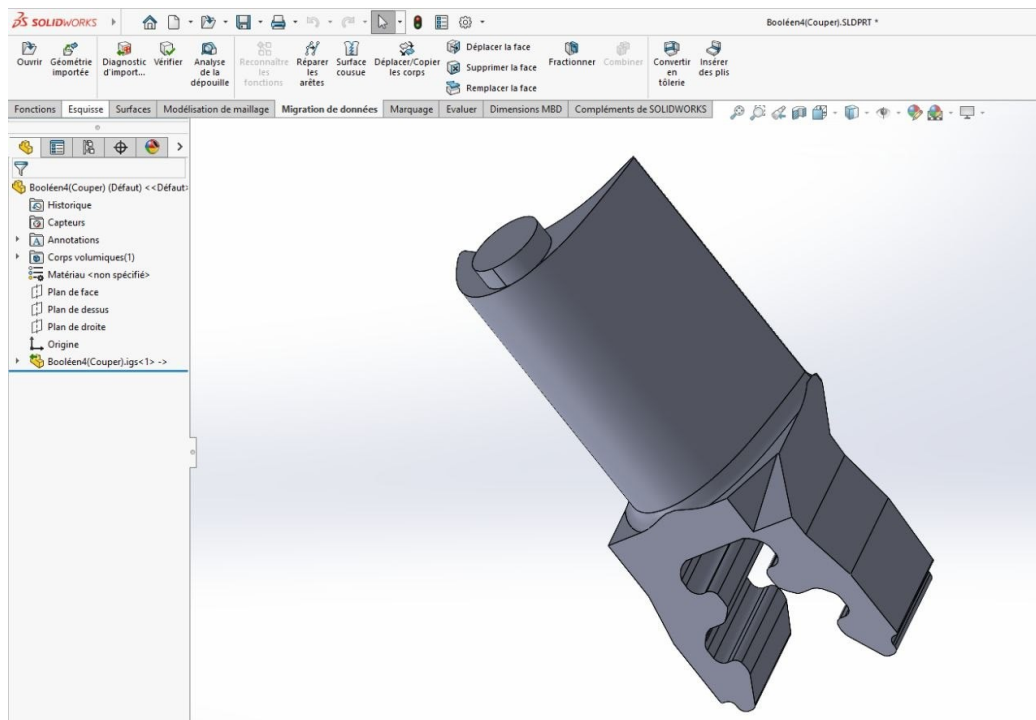


Figure 3.14 : model CAO dans SolidWorks

Evaluation de la précision :

-Analyse de déviation (nuage de points par rapport au CAO) :

Le modèle de solide ou de surface est comparé aux données de scan sources. Cette comparaison peut être activée pendant une commande de modélisation ou en mode neutre. Cette commande peut être utilisée pour prendre des décisions de modélisation plus précises afin d'obtenir des résultats optimaux.

Le logiciel Geomagic Control X a été utilisé pour évaluer la précision (voir la Figure 3.15)

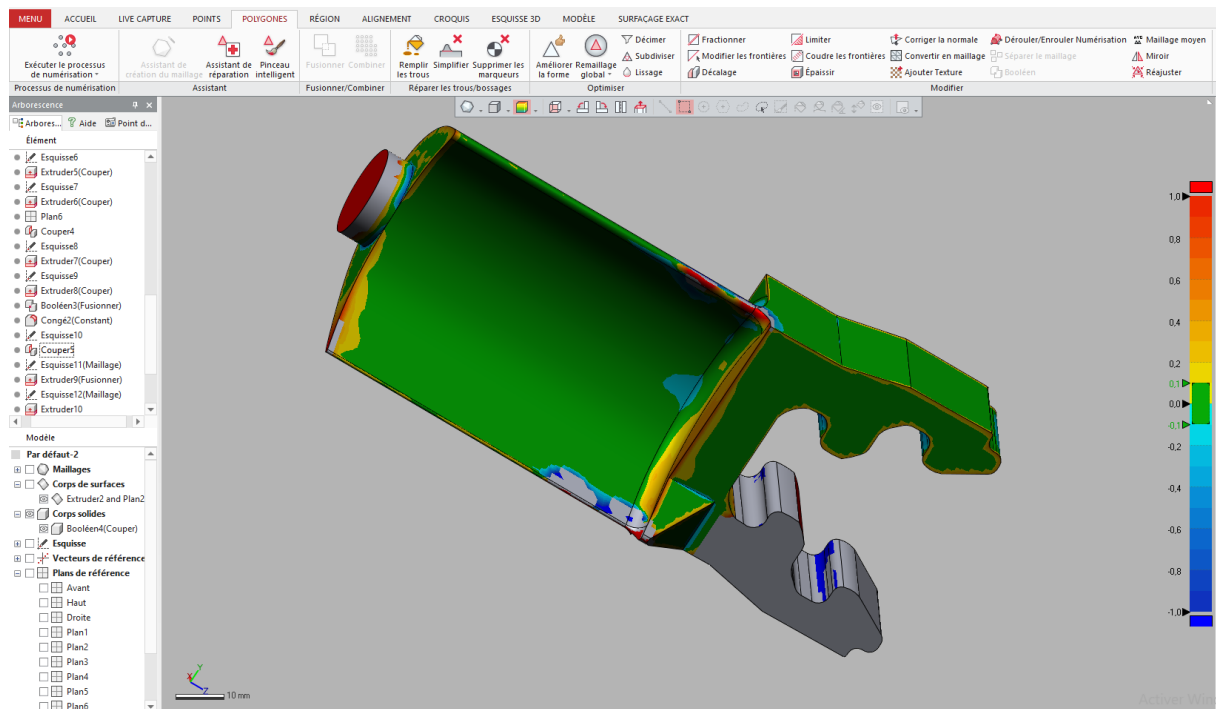


Figure 3.15 : résultat de control dans GEOMAGIC X

3.2. Fabrication du prototype

3.2.1. Étapes d'usinage ou impression

1. Conception du modèle numérique (CAO)

La première étape consiste à réaliser la modélisation de la pièce à l'aide d'un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) tel que SolidWorks. Le modèle obtenu est ensuite exporté dans un format standard de fabrication additive, généralement STL, permettant de représenter la géométrie de la pièce sous forme triangulée.

2. Préparation et découpage (Slicing)

Le fichier STL est importé dans un logiciel de slicing (Cura, PrusaSlicer, etc.). Cette étape permet de :

- Convertir le modèle 3D en couches successives,
- Générer le **code machine (G-code)**,
- Définir la stratégie de fabrication.

3. Paramétrage des conditions d'impression

Avant le lancement de l'impression, plusieurs paramètres doivent être définis :

- Hauteur de couche (résolution),
- Température d'extrusion et du plateau,
- Vitesse d'impression,
- Taux et structure de remplissage
- Génération des supports pour les surplombs.

Ces paramètres influencent directement la qualité, la précision et le temps de fabrication.

4. Fabrication additive (Impression 3D)

L'imprimante 3D réalise la fabrication de la pièce par dépôt successif de matière. Le processus est entièrement automatisé et suit les instructions du G-code, permettant la construction **couche par couche** jusqu'à obtention de la géométrie finale (figure 3.16).

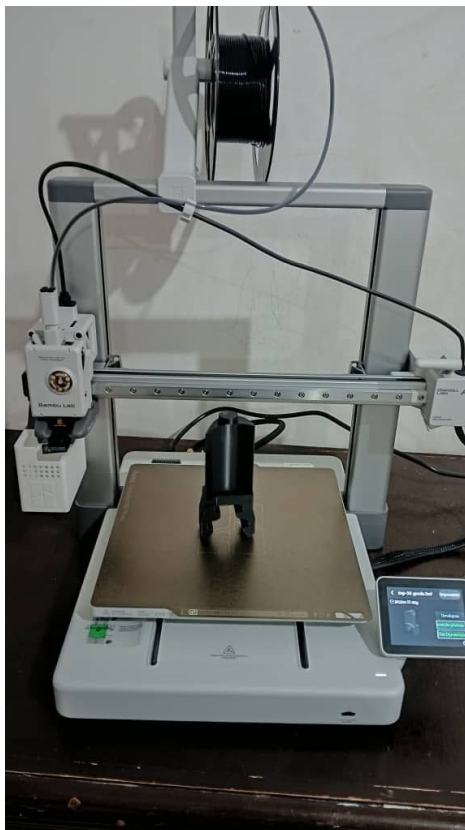


Figure 3.16 : Impression 3D de pièce

5. Refroidissement et extraction de la pièce

Après la fin de l'impression, la pièce est laissée au refroidissement afin de stabiliser ses propriétés mécaniques.

Elle est ensuite retirée avec précaution du plateau de fabrication (figure3.17).



Figure 3.17 : la pièce finie obtenue après fabrication par rapport à la pièce endommagée

3.2.2. Résultats et discussion

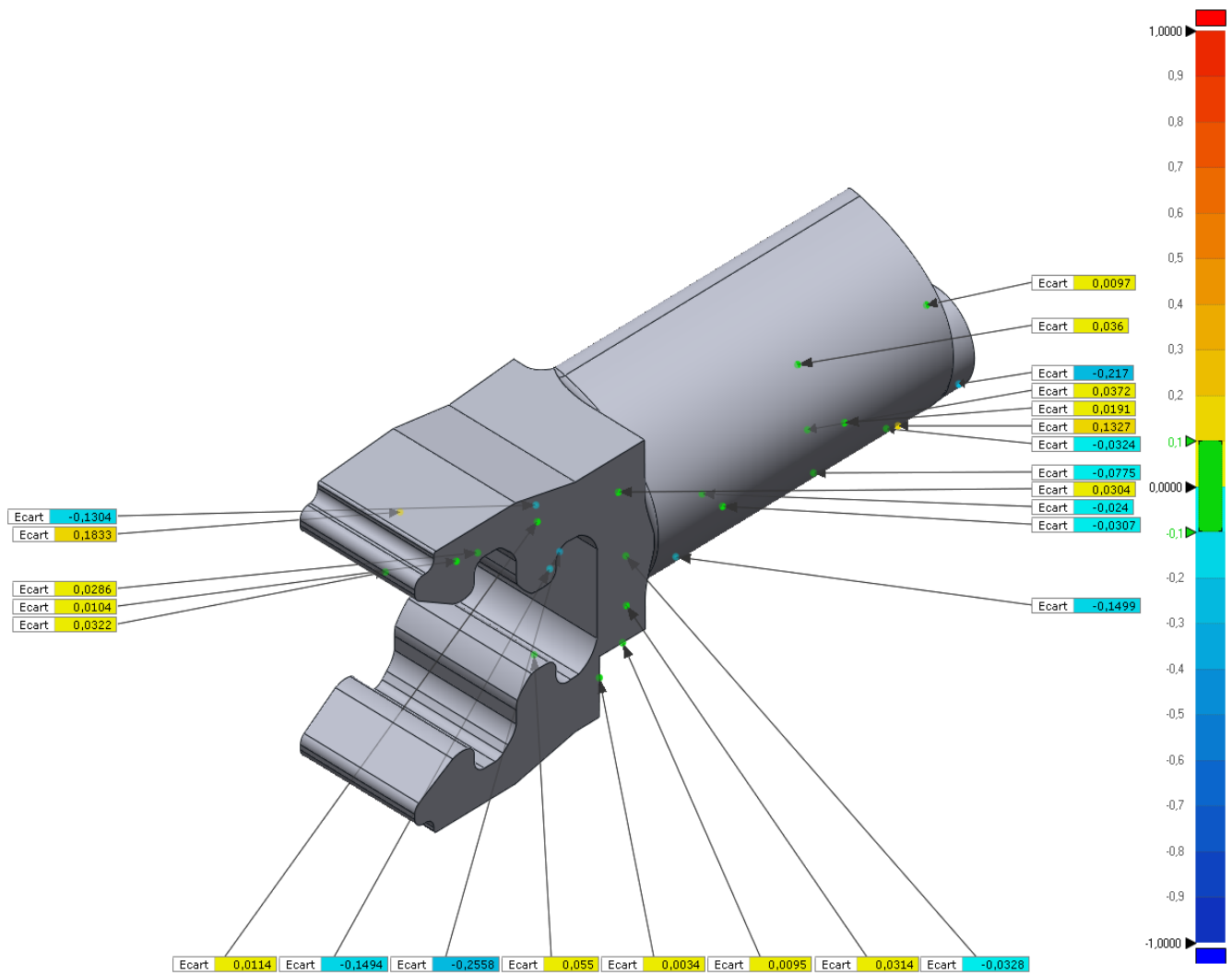


Figure 3.18 : Résultats du contrôle métrologique de l'ailette de turbine après rétroconception et reconstruction numérique.

Nom	Nom du résultat	Tolérance	Ecart	Position de référence			Position Mesurée		
				X	Y	Z	X	Y	Z
CMP4: 1	Données de résultats - 1	±0,1	0,0372	-29,2731	-21,9998	-524	-29,2602	-22,0347	-524
CMP4: 2	Données de résultats - 1	±0,1	-0,024	-29,2731	-21,9998	-498	-29,2815	-21,9773	-498
CMP4: 3	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0328	-24,099	-19,9996	-474	-24,1112	-19,9691	-474
CMP4: 4	Données de résultats - 1	±0,1	-0,1494	-34,8734	-23,9992	-466	-34,9211	-23,8576	-466
CMP4: 5	Données de résultats - 1	±0,1	-0,2558	-38,1543	-24,9994	-471,7031	-38,2198	-24,7522	-471,7031
CMP4: 6	Données de résultats - 1	±0,1	0,1327	-4,9	-7,9975	-522	-4,799	-8,0836	-522
CMP4: 7	Données de résultats - 1	±0,1	-0,1499	-11,7517	-13,9979	-474	-11,833	-13,872	-474
CMP4: 8	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0307	-0,2569	2,0004	-474	-0,2874	2,004	-474
CMP4: 9	Données de résultats - 1	±0,1	0,0191	-0,1778	4	-504	-0,1587	4,0008	-504
CMP4: 10	Données de résultats - 1	±0,1	0,0095	-2,9197	-16	-452	-2,913	-16,0068	-451,9999
CMP4: 11	Données de résultats - 1	±0,1	0,055	-20,6963	-25,3202	-447,9397	-20,6963	-25,3753	-447,9397

CMP4: 12	Don nées de résult ats - l	±0,1	0,0314	0	-6	-450	0,0314	-6	-450
CMP4: 13	Don nées de résult ats - l	±0,1	0,0304	0	18	-448	0,0304	18	-448
CMP4: 14	Don nées de résult ats - l	±0,1	0,0104	0	24	-408	0,0104	24	-408
CMP4: 15	Don nées de résult ats - l	±0,1	0,0322	-12,4403	18,0907	-402,9587	-12,4403	18,0628	-402,9426
CMP4: 16	Don nées de résult ats - l	±0,1	0,0286	-15,0952	7,9542	-428,404	-15,0952	7,9257	-428,4035
CMP4: 17	Don nées de résult ats - l	±0,1	0,1833	-19,6522	21,2125	-413,8079	-19,6522	21,0464	-413,8854
CMP4: 18	Don nées de résult ats - l	±0,1	-0,1304	-12,7175	12,7994	-440,4052	-12,7175	12,9001	-440,4881
Nom	Nom du résultat	Toléranc e	Ecart	Position de référence			Position Mesurée		
				X	Y	Z	X	Y	Z
CMP4: 19	Don nées de résult ats - l	±0,1	-0,217	-1,8699	-3,9983	-534	-2,0694	-3,913	-534
CMP4: 20	Don nées de résult ats - l	±0,1	0,0114	0	22	-428	0,0114	22	-428
CMP4: 21	Don nées de résult ats - l	±0,1	0,0034	-4,6752	-22	-448	-4,6728	-22	-448,0024
CMP4: 22	Don nées de résult ats - l	±0,1	0,0097	-3,8606	13,997	-528	-3,853	14,003	-528
CMP4: 23	Don nées	±0,1	0,036	-5,6814	15,9967	-498	-5,6563	16,0224	-498

	de résult ats - 1								
CMP4: 24	Don nées de résult ats - 1	±0,1	-0,0775	-11,7517	-13,9979	-508	-11,7937	-13,9328	-508
CMP4: 25	Don nées de résult ats - 1	±0,1	-0,0324	-11,7517	-13,9979	-526	-11,7693	-13,9707	-526

Les résultats du contrôle dimensionnel réalisés sur Geomagic Control X montrent le niveau de concordance entre la pièce réelle et le modèle reconstruit après l'opération de rétroconception. La cartographie colorimétrique indique que la majorité des surfaces apparaissent en vert, ce qui signifie que les écarts mesurés restent dans les tolérances admissibles. Cela traduit une bonne précision du processus de numérisation et de reconstruction géométrique.

Cependant, certaines zones présentent des couleurs jaunes et rouges, notamment au niveau des arêtes et des zones de transition géométrique. Ces écarts peuvent être expliqués par la complexité de la géométrie, les difficultés de capture lors du scan ou encore les imperfections liées au traitement du maillage. Les zones en bleu correspondent quant à elles à des écarts négatifs, indiquant un léger manque de matière ou des différences mineures entre la pièce réelle et le modèle CAO.

D'une manière générale, les résultats obtenus confirment la fiabilité de la méthode de rétroconception utilisée. Le modèle final reproduit fidèlement la géométrie de la pièce d'origine, ce qui permet son exploitation dans des applications de fabrication, de contrôle dimensionnel ou d'impression 3D.

3.2.3. Conclusion :

La rétro-conception des ailettes de turbine est une méthode complexe et coûteuse, mais elle est très bénéfique pour garantir la disponibilité de pièces de rechange, améliorer les performances de la turbine ou résoudre des problèmes de maintenance. Dans cette étude, une approche de rétro-conception pour des pièces de formes complexes a été développée et appliquée en utilisant les technologies de numérisation 3D les plus avancées.

Après les étapes de numérisation, de traitement de nuages de points, de reconstruction du modèle CAO, d'alignement et de recalage, ainsi que d'analyse des résidus, les résultats obtenus ont démontré une grande précision permettant de traiter avec succès toute pièce complexe, quel que soit son niveau de précision.

Conclusion Générale

Au terme de ce travail consacré à la rétroconception intelligente et à la fabrication optimisée de composants industriels, une démarche méthodologique complète a été développée et appliquée avec succès à une ailette de turbine présentant une géométrie complexe et des zones dégradées.

Cette étude a permis de mettre en évidence l'intérêt croissant des technologies de numérisation 3D et de rétroconception dans le domaine industriel, notamment pour la maintenance, la reproduction de pièces obsolètes et la réduction des délais de développement. L'utilisation combinée des outils de numérisation, de reconstruction CAO et de fabrication additive constitue aujourd'hui une solution performante pour répondre aux exigences de précision et de flexibilité imposées par l'industrie moderne.

Dans un premier temps, l'analyse bibliographique réalisée a permis de présenter les fondements théoriques de la rétroconception, les principales techniques de numérisation tridimensionnelle, les caractéristiques des superalliages à base de nickel ainsi que les procédés de fabrication adaptés aux composants mécaniques complexes. Cette étude a fourni les connaissances nécessaires à la compréhension et à la mise en œuvre de la démarche expérimentale.

Dans un second temps, la pièce étudiée a été numérisée à l'aide d'un scanner 3D portable afin d'acquérir sa géométrie sous forme de nuage de points. Les données obtenues ont ensuite été traitées et exploitées à l'aide du logiciel Geomagic Design X pour reconstruire un modèle CAO paramétrique fidèle à la géométrie d'origine. Les zones endommagées ont été restaurées et intégrées au modèle numérique, permettant ainsi la reconstitution complète du composant.

L'évaluation de la qualité de reconstruction, réalisée par comparaison entre le modèle CAO et les données issues de la numérisation, a montré une bonne concordance géométrique et des écarts globalement contenus dans les tolérances admissibles. Ces résultats confirment la fiabilité de la méthodologie adoptée et démontrent la capacité des outils utilisés à reproduire avec précision des pièces mécaniques de formes complexes.

Enfin, la fabrication d'un prototype à partir du modèle reconstruit a permis de valider concrètement la chaîne numérique mise en place, depuis l'acquisition des données jusqu'à la

production de la pièce. Cette étape a confirmé l'intérêt de l'intégration des technologies de rétroconception et de fabrication additive pour la reproduction rapide et efficace de composants industriels.

Les résultats obtenus montrent que la démarche proposée constitue une solution pertinente pour la restauration, la reproduction et l'optimisation de pièces mécaniques complexes. Elle contribue à réduire les coûts liés au développement de produits, à améliorer la disponibilité des pièces de rechange et à renforcer les capacités d'innovation dans les secteurs industriels de pointe.

Comme perspectives, ce travail pourrait être enrichi par l'intégration d'outils d'intelligence artificielle pour l'automatisation de certaines étapes de reconstruction géométrique, par la réalisation d'analyses mécaniques avancées à l'aide de simulations par éléments finis, ainsi que par l'étude de procédés de fabrication métallique permettant la production directe de pièces fonctionnelles destinées à des environnements industriels sévères.

Ainsi, la rétroconception apparaît aujourd'hui comme un levier stratégique pour l'industrie du futur, en associant acquisition numérique, modélisation intelligente et fabrication avancée au service de l'innovation et de la performance industrielle.

ANNEXE

G-code :

```

M73 P0 R140
M201 X12000 Y12000 Z1500 E5000
M203 X500 Y500 Z30 E30
M204 P12000 R5000 T12000
M205 X9.00 Y9.00 Z3.00 E3.00
; FEATURE: Custom
;===== machine: A1 =====
;===== date: 20250822 =====
G392 S0
M9833.2
;M400
;M73 P1.717

;===== start to heat heatbead&hotend=====
M1002 gcode_claim_action : 2
M1002 set_filament_type:PLA
M104 S140
M140 S65

;=====start printer sound =====
M17
M400 S1
M1006 S1
M1006 A0 B10 L100 C37 D10 M60 E37 F10 N60
M1006 A0 B10 L100 C41 D10 M60 E41 F10 N60
M1006 A0 B10 L100 C44 D10 M60 E44 F10 N60
M1006 A0 B10 L100 C0 D10 M60 E0 F10 N60
M1006 A43 B10 L100 C46 D10 M70 E39 F10 N80
M1006 A0 B10 L100 C0 D10 M60 E0 F10 N80
M1006 A0 B10 L100 C43 D10 M60 E39 F10 N80
M1006 A0 B10 L100 C0 D10 M60 E0 F10 N80
M1006 A0 B10 L100 C41 D10 M80 E41 F10 N80
M1006 A0 B10 L100 C44 D10 M80 E44 F10 N80
M1006 A0 B10 L100 C49 D10 M80 E49 F10 N80
M1006 A0 B10 L100 C0 D10 M80 E0 F10 N80
M1006 A44 B10 L100 C48 D10 M60 E39 F10 N80
M1006 A0 B10 L100 C0 D10 M60 E0 F10 N80
M1006 A0 B10 L100 C44 D10 M80 E39 F10 N80
M1006 A0 B10 L100 C0 D10 M60 E0 F10 N80
M1006 A43 B10 L100 C46 D10 M60 E39 F10 N80
M1006 W
M18
;=====start printer sound =====

;=====avoid end stop =====

```

```
G91
G380 S2 Z40 F1200
G380 S3 Z-15 F1200
G90

;===== reset machine status =====
;M290 X39 Y39 Z8
M204 S6000

M630 S0 P0
G91
M17 Z0.3 ; lower the z-motor current

G90
M17 X0.65 Y1.2 Z0.6 ; reset motor current to default
M960 S5 P1 ; turn on logo lamp
G90
M220 S100 ;Reset Feedrate
M221 S100 ;Reset Flowrate
M73.2 R1.0 ;Reset left time magnitude
;M211 X0 Y0 Z0 ; turn off soft endstop to prevent protential logic problem

;===== cog noise reduction=====
M982.2 S1 ; turn on cog noise reduction

M1002 gcode_claim_action : 13

G28 X
G91
G1 Z5 F1200
G90
G0 X128 F30000
G0 Y254 F3000
G91
G1 Z-5 F1200

M109 S25 H140

M17 E0.3
M83
G1 E10 F1200
G1 E-0.5 F30
M17 D

G28 Z P0 T140; home z with low precision,permit 300deg temperature
M104 S220

M1002 judge_flag build_plate_detect_flag
M622 S1
G39.4
```

```
G90
G1 Z5 F1200
M623

;M400
;M73 P1.717

;===== prepare print temperature and material =====
M1002 gcode_claim_action : 24

M400
;G392 S1
M211 X0 Y0 Z0 ;turn off soft endstop
M975 S1 ; turn on

G90
G1 X-28.5 F30000
G1 X-48.2 F3000

M620 M ;enable remap
M620 S0A ; switch material if AMS exist
  M1002 gcode_claim_action : 4
  M400
  M1002 set_filament_type:UNKNOWN
  M109 S220
  M104 S250
  M400
  T0
  G1 X-48.2 F3000
  M400

  M620.1 E F399.119 T240
  M109 S250 ;set nozzle to common flush temp
  M106 P1 S0
  G92 E0
  G1 E50 F200
  M400
  M1002 set_filament_type:PLA
M621 S0A

M109 S240 H300
G92 E0
G1 E50 F200 ; lower extrusion speed to avoid clog
M400
M106 P1 S178
G92 E0
G1 E5 F200
M104 S220
G92 E0
M73 P1 R139
```

```
G1 E-0.5 F300

G1 X-28.5 F30000
M73 P1 R138
G1 X-48.2 F3000
G1 X-28.5 F30000 ;wipe and shake
G1 X-48.2 F3000
G1 X-28.5 F30000 ;wipe and shake
G1 X-48.2 F3000

;G392 S0

M400
M106 P1 S0
;===== prepare print temperature and material end =====

;M400
;M73 P1.717

;===== auto extrude cali start =====
M975 S1
;G392 S1

G90
M83
T1000
G1 X-48.2 Y0 Z10 F10000
M400
M1002 set_filament_type:UNKNOWN

M412 S1 ; ===turn on filament runout detection===
M400 P10
M620.3 W1; === turn on filament tangle detection===
M400 S2

M1002 set_filament_type:PLA

;M1002 set_flag extrude_cali_flag=1
M1002 judge_flag extrude_cali_flag

M622 J1
  M1002 gcode_claim_action : 8

M109 S220
G1 E10 F377.08
```

Références bibliographiques

- [1] P. Benk\Ho and T. Várady, “Segmentation methods for smooth point regions of conventional engineering objects,” *Comput. Des.*, vol. 36, no. 6, pp. 511–523, 2004
- [2] V. Raja and K. J. Fernandes, *Reverse Engineering: An Industrial Perspective*, Londres : Springer, 2008.
- [3] P. Benko, T. Varady, G. Kós et M. Kosinka, “Reverse engineering regular objects: simple segmentation and surface fitting procedures,” *International Journal of Shape Modeling*, vol. 8, no. 2, pp. 127–141, 2002.
- [4] A. Durupt, S. Remy, and G. Ducellier, “Knowledge based reverse engineering—An approach for reverse engineering of a mechanical part,” *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 4, 2010.
- [5] Thèse de doctorat présenté par BENJAMIN LORIOT. Automatisation de l’Acquisition et des Post-traitements en Numérisation 3D.
- [6] G. Sansoni, M. Trebeschi and F. Docchio, “State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation,” *Sensors*, vol. 9, no. 1, pp. 568–601, 2009.
- [7] Sébastien Chollet. Étude des modifications microstructurales de superalliages a base nickel induites par nitruration assistée plasma.2014. Poitiers. France
- [8] G. P. Sabol et R. Stickler, « Microstructure of Nickel-Based Superalloys », *physica status solidi (b)*, vol. 35, no 1, p. 11–52, 1969.
- [9] S. Azadian, L.-Y. Wei, et R. Warren, « Delta phase precipitation in Inconel 718 », *Materials Characterization*, vol. 53, no 1, p. 7-16, sept. 2004.
- [10] Y. Altintas, *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design*, Cambridge University Press, 2012.
- [11] J.-C. André, *Fabrication additive : impression 3D, prototypage rapide*, Paris : Hermès Science Publications, 2017.
- [12] Techniques de l’Ingénieur, “Moulage sous pression des alliages légers,” Paris, 2018.

- [13] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design*, 4e éd., Oxford : Elsevier, 2011.
- [14] Conception d'une aube de turbine à gaz en matériaux Composites Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTÈRE En Mécanique par KLAA EFTIKHAR
- [15] Hibbeler, R.C., *Mechanics of Materials*, 10th Edition, Pearson, 2017.
- [16] Raja, V., & Fernandes, K. J. (2008). *Reverse Engineering: An Industrial Perspective*. Springer.
- [17] A 3D ACQUISITION AND MODELLING SYSTEM S. Mahadevan, H. Pandzo, M. Bennamoun , J.A. Williams Space Centre for Satellite Navigation Queensland University of Technology, Brisbane, Australia.
- [18] DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE titre : SELECTION ET AMELIORATION DE NUAGES DE POINTS 3D Présentée par : M. ADRIEN HAMELIN le mercredi 16 décembre 2015.
- [19] Blogs .solidworks.com.
- [20] Sansoni, G., Trebeschi, M., & Docchio, F. (2009). *State-of-the-art and applications of 3D imaging sensors in industry*.
- [21] Boyce, M. P. (2011). *Gas Turbine Engineering Handbook*. Elsevier

ملخص

تتناول هذه المذكرة تطبيق منهجية الهندسة العكسية على ريشة توربينية بهدف إعادة بناء وإنتاج قطعة ميكانيكية معقدة انطلاقاً من نموذج حقيقي متضرر. اعتمدت الدراسة على المسح ثلاثي الأبعاد، ومعالجة سحابة النقاط، وإعادة بناء نموذج رقمي باستخدام برنامج Geomagic Design X، ثم التحقق من دقته بواسطة برنامج Geomagic Control X. كما تم تصنيع نموذج أولي باستعمال الطباعة ثلاثية الأبعاد للتحقق من فعالية سلسلة العمل الرقمية المعتمدة. أظهرت النتائج توافقاً جيداً بين النموذج المعاد بناؤه والقطعة الأصلية، مما يؤكد فعالية المنهجية المقترحة في صيانة وإعادة إنتاج وتحسين المكونات الصناعية المعقدة.

الكلمات المفتاحية: الهندسة العكسية، المسح ثلاثي الأبعاد، التصميم بمساعدة الحاسوب، سحابة النقاط، التصنيع الإضافي، الطباعة ثلاثية الأبعاد، ريشة توربينية.

Abstract

This thesis presents a reverse engineering approach applied to a turbine blade in order to reconstruct and reproduce a complex mechanical component from a damaged physical part. The methodology is based on 3D scanning, point cloud processing, CAD reconstruction using Geomagic Design X, and geometric inspection with Geomagic Control X. A prototype was subsequently manufactured through 3D printing to validate the developed digital workflow. The obtained results demonstrate a high level of agreement between the reconstructed model and the original component, confirming the effectiveness of the proposed approach for the maintenance, reproduction, and optimization of complex industrial parts.

Keywords: reverse engineering, 3D scanning, CAD reconstruction, point cloud, additive manufacturing, 3D printing, turbine blade.

Résumé

Ce mémoire présente une démarche de rétroconception appliquée à une ailette de turbine afin de reconstruire et reproduire une pièce mécanique complexe à partir d'un composant réel endommagé. La méthodologie adoptée repose sur la numérisation 3D, le traitement des nuages de points, la reconstruction d'un modèle CAO sous Geomagic Design X et le contrôle géométrique à l'aide de Geomagic Control X. Un prototype a ensuite été fabriqué par impression 3D afin de valider la chaîne numérique développée. Les résultats obtenus montrent une bonne concordance entre le modèle reconstruit et la pièce d'origine, confirmant l'efficacité de la démarche proposée pour la maintenance, la reproduction et l'optimisation de composants industriels complexes.

Mots-clés : rétroconception, numérisation 3D, CAO, nuage de points, fabrication additive, impression 3D, ailette de turbine.