

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université M'Hamed Bougara-Boumerdes
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département Transport et Equipements des Hydrocarbures

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Hydrocarbure

Option : Génie mécanique-Mécanique des chantiers pétroliers

Présenté par :

BENSEKHRIA ELYES

BOUCHENINE LOUAI DHIA

THEME

**Conception et fabrication de pièces d'équipements pétrolier par
l'impression 3D à travers la méthode de Reverse Engineering**

Soutenu publiquement le 23 / 06 / 2024

Devant le jury :

	Nom et Prénom	Grade	Université/Affiliation
Président de jury	GACEB MOHAMED	Professeur	
Examineur	HARHOUT RIAD	MA/A	UMBB
Examineur	SABRI KHIER	MC/B	UMBB
Encadreur	BLOUL BENATIA	MC/A	UMBB

Remerciement

A Dieu tout le merci.

Ce mémoire, ne pourrait exister sans l'aide et l'engagement d'un certain nombre de personnes qui ont décidé de nous accompagner résolument dans notre parcours. Que tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué par leurs conseils, leurs encouragements et leur assistance à l'aboutissement de ce travail, trouvent ici l'expression ma profonde gratitude. Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur ;Bloul benatia, pour les efforts qu'il n'a cessé de ménager pour nous aider et nous orienter, jusqu'à la finalisation de ce modeste travail. Je tiens aussi à remercier Chacun des membres du jury pour m'avoir fait l'insigne honneur d'accepter d'examiner mon travail.

Dedicace

A ma chère mère,

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mes chères ami(e)s, spécialement Mohamed ,Nadji ,Malek et Aissa, Tamiza

ELYES,

Dedicace

Je dédie ce modeste travail et ma sincère gratitude :

A mon chère père ;

A mon adorable et joyeuse mère ;

A toute la famille Bouchemine ;

A tous mes amis ; Amir, Ramzi, Anes, Anis

A tous mes camarades : Elyes, Moh, Aissa

Louai Dhia Erahmane,

Sommaire

Table des matières

Liste des abréviations	X
Résumé.....	XI
Introduction Générale	1
CHAPITRE.I. Généralité sur les techniques de reverse engineering leur application à la conception des aubes de turbine à gaz.....	2
I.1. Introduction	2
I.2. Généralités des aubes de turbine	3
I.2.1. Aperçu des aubes de turbine	3
I.2.2. Turbine à gaz.....	3
I.2.3. Classification de turbine à gaz	5
I.2.4. Aubage.....	5
I.2.5. Catégories des aubes	6
I.3. Historique et Révolution du Reverse Engineering des Pièces Mécaniques	8
I.3.1. Historique du reverse engineering des pièces mécaniques.....	8
I.3.2. Révolution du reverse engineering des pièces mécaniques.....	9
I.4. Objectifs d'application du reverse engineering dans le secteur pétrolier	9
I.5. Reverse engineering : concepts et processus.....	10
I.5.1. Concepts	10
I.5.2. Processus d'application du reverse engineering.....	11
I.6. Avantages et inconvénients reverse engineering.....	13
I.6.1. Avantages	13
I.6.2. Inconvénients	14
I.7. Conclusion.....	15
CHAPITRE.II. Numérisation de la pièce pour l'application du reverse engineering.....	17
II.1. Introduction	18
II.2. Techniques et des outils de numérisations dans reverse engineering.....	19
II.2.1. Scanner à lumière structurée	19

II.2.2.	Dual axis Turntable.....	22
II.2.3.	Préparation l'installation le matériel de scan	23
II.2.4.	Exploitation du logiciel Revo scan	23
II.3.	Post-traitement des données de numérisation Par REVO SCAN 5.....	30
II.3.1.	Nuages de points individuels.....	30
II.3.2.	Alignement initial	30
II.3.3.	Fusion des nuages de points	30
II.3.4.	Élimination des doublons.....	31
II.3.5.	Correction des défauts.....	31
II.3.6.	Optimisation de la géométrie	31
II.3.7.	Validation et ajustements finaux	31
II.4.	Avantages de la numérisation dans RE.....	32
II.4.1.	Avantages	32
II.5.	Conclusion.....	33
CHAPITRE.III.	Modélisation de l'aube de turbine à gaz à l'aide des outils de CAO	34
III.1.	Introduction	35
III.2.	Notion de modélisation	35
III.2.1.	Nuage de points et scan.....	36
III.2.2.	Filtrage de nuages de points	37
III.2.3.	Format SLDPRT	38
III.2.4.	Format XYZ	38
III.2.5.	Format STL	39
III.3.	Méthode des moindres carrés	39
III.3.1.	Exemple de méthodes moindre carré 2d.....	40
III.3.2.	Exemple de méthodes moindre carré 3D	47
III.4.	Apport d'outil de CAO pour la modélisation de l'aube de turbine à gaz	50
III.5.	Visualisation d'écart déviation entre le modèle et l'aube scannée	54
III.6.	Conclusion.....	57
CHAPITRE.IV.	Mise en œuvre l'impression en 3D en utilisant la méthode de reverse engineering	58
IV.1.	Introduction	59
IV.2.	Principe et technologie de l'impression 3D	59

IV.3. Type d'impression en 3D	61
IV.3.1. Dépôt de filament fondu (FFF)(FDM).....	61
IV.3.2. Photo polymérisation	64
IV.3.3. Fusion de poudre	65
IV.4. Matériaux utilisés de l'impression 3D	66
IV.4.1. Matériaux plastiques	66
IV.4.2. Poudre de polyamide	68
IV.4.3. Poudre d'alumide.....	68
IV.4.4. Résine liquide	68
IV.4.5. Poudres métalliques	69
IV.4.6. Céramique	70
IV.5. Impression par dépôt de filament fondu	70
IV.5.1. Logiciel de découpe	70
IV.5.2. Paramétrage du logiciel de découpe	70
IV.5.3. Condition de travail	74
IV.5.4. Préparation pour le lancement d'impression.....	77
IV.5.5. Lancement d'impression	77
IV.5.6. Récupération de la pièce	77
IV.6. Avantages et Inconvénients de l'impression 3D	78
IV.6.1. Avantages de l'Impression 3D	78
IV.6.2. Inconvénients de l'Impression 3D.....	79
IV.7. Conclusion.....	80
Conclusion Générale.....	82
Référence bibliographiques.....	84

Liste des figures

Figure I.1 Cycle de reverse engineering	2
Figure I.2 Principe de fonctionnement de turbine à gaz	4
Figure I.3 Classification de turbine à gaz	5
Figure I.4 Profile d'aube de turbine à gaz	6
Figure I.5 Différents types d'aube de turbine	6
Figure I.6 Stator et rotor de l'aube de turbine	7
Figure I.7 Montage d'aube dans la roue du rotor.....	7
Figure I.8 Machines à mesurer tridimensionnelles avec scan (CMM).....	8
Figure I.9 Pièces mécaniques à scanner.....	9
Figure I.10 Processus de Reverse engineering.....	12
Figure II.1 Organigramme de reverse engineering.....	18
Figure II.2 Projection des rayons de la lumière et la camera de scanner 3D	19
Figure II.3 Scanner REVOPOINT Mini 3D	20
Figure II.4 Une aube placée sur un Dual axis Turntable	22
Figure II.5 Une aube de turbine.....	22
Figure II.6 Installation du matériel du scan	23
Figure II.7 (a) (b) (c) Revo scan.....	24
Figure II.8 Revo Scan 5	24
Figure II.9 Panneau du menu principal.....	25
Figure II.10 Interface de la numérisation.....	26
Figure II.11 (1) (2) (3) exposition de la pièce sur le scanner	28
Figure II.12 Schéma des étapes à suivre.....	29
Figure II.13 Nuage de points capturé	30
Figure II.14 correction primaire des défauts de la pièce.....	31
Figure III.1 nuage de points de l'aube	36
Figure III.2 Nuage de points d'aube après le filtrage.	37
Figure III.3 model SLDPRT	38
Figure III.4 Format STL (triangulation)	39

Figure III.5 Régression linéaire par méthode des moindres carrés	43
Figure III.6 Ajustement d'un cercle par la méthode des moindres des carrés	45
Figure III.7 Ajustement d'un polynôme par moindres carrés	47
Figure III.8 Ajustement d'une surface quadratique par méthodes des moindres des carrés...	49
Figure III.9 Maillage et nuage de point de l'aube de turbine à gaz.....	51
Figure III.10 Sections planes sur l'aube de turbine	52
Figure III.11 Sections planes sur aube de turbine sans nuage de point et maillage	53
Figure III.12 Courbes de scan sur l'aube de turbine sans nuage	53
Figure III.13 Contour surfacique de modèle avec une courbe de scan.....	54
Figure III.14 Modèle surfacique avec le nuage de point d'aube de turbine	55
Figure III.15	55
Figure III.16 Modèle en plein avec affichage rendu réaliste	56
Figure III.17 Modèle final coloré en acier avec affichage rendu réaliste	56
Figure IV.1 Principe général de l'impression 3D.....	60
Figure IV.2 Composantes de l'imprimante 3D	62
Figure IV.3 Principe de fonctionnement d'une imprimante 3D FFF	63
Figure IV.4 Principe de fonctionnement d'une imprimante 3D SLA	64
Figure IV.5 Principe de fonctionnement d'une imprimante 3D SLS.....	65
Figure IV.6 l'orientation de la pièce dans le logiciel de découpe	71
Figure IV.7 motifs de remplissage	72
Figure IV.8 Trois épaisseurs de couche, de la plus fine (à gauche) à la plus épaisse (à droite)	73
Figure IV.9 positionnement (A) (B) et (C) de la pièce	74
Figure IV.10 l'emplacement de matériel d'impression	76
Figure IV.11 Affichage de l'écran d'imprimante.....	76
Figure IV.12 l'impression de la pièce.....	77

Listes des tableaux

Table II-1 Spécification de l'outil	21
Table III-1 Variables x_i y_i	41
Table III-2. Caractéristique de fichier	50
Table IV-1 liste de matériel du poste d'impression 3D	75

Liste des abréviations

CAO : Conception Assistée par Ordinateur.

FAO : Fabrication Assistée par Ordinateur.

CNESE : Conseil National Économique Social et Environnemental.

CMM : Coordinate Measuring Machine (Machine à Mesurer Tridimensionnelle).

DLP : Digital Light Processing.

FFF : Fused Filament Fabrication.

SLA : Stéréolithographie.

SLS : Selective Laser Sintering (Frittage Sélectif par Laser).

SLM : Selective Laser Melting (Fusion Sélective par Laser).

IAO : Ingénierie Assistée par Ordinateur.

3D : Trois Dimensions

CAD : Conception Assistée par Ordinateur

CAE : Calcul Assisté par Ordinateur

CFAO : Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur

CNC : Computer Numerical Control

FQ : Fabrication Qualité

STL : Stereolithography File Format

Résumé

Le reverse engineering des pièces mécaniques est une pratique consistant à analyser et comprendre le fonctionnement, la conception et les caractéristiques d'une pièce mécanique existante, en partant de son état final pour remonter à sa conception initiale. Cela implique souvent la déconstruction physique de la pièce ainsi que l'utilisation de divers outils tels que la modélisation 3D, la numérisation, l'analyse des matériaux et des processus de fabrication. Cette méthode est largement utilisée dans l'ingénierie, la fabrication, la réparation, et même la conception de produits concurrents. Les technologies modernes comme la numérisation 3D et la modélisation assistée par ordinateur ont considérablement facilité ce processus, permettant la création de modèles numériques précis à partir de données physiques existantes, ce qui permet aux ingénieurs de travailler avec une plus grande précision et efficacité.

Abstract

Reverse engineering of mechanical parts involves analyzing and understanding the operation, design, and characteristics of an existing mechanical part by tracing back from its final state to its initial design. This often involves physical deconstruction of the part as well as the use of various tools such as 3D modeling, scanning, material analysis, and manufacturing processes. This method is widely used in engineering, manufacturing, repair, and even in designing competitive products. Modern technologies like 3D scanning and computer-aided design have significantly facilitated this process, allowing for the creation of precise digital models from existing physical data, enabling engineers to work with greater precision and efficiency.

ملخص

الهندسة العكسية للأجزاء الميكانيكية هي ممارسة تتضمن تحليل وفهم عمل وتصميم وخصائص جزء ميكانيكي موجود، بدءًا من حالته النهائية للوصول إلى تصميمه الأولي. غالبًا ما يتطلب ذلك التفكيك الفيزيائي للجزء واستخدام أدوات مختلفة مثل النمذجة ثلاثية الأبعاد والمسح الضوئي وتحليل المواد وعمليات التصنيع. تُستخدم هذه الطريقة على نطاق واسع في الهندسة والتصنيع والإصلاح وحتى في تصميم المنتجات المنافسة. لقد سهلت التقنيات الحديثة مثل المسح الضوئي ثلاثي الأبعاد والتصميم بمساعدة الكمبيوتر هذه العملية بشكل المهندسين من العمل بدقة وكفاءة أكبر. مما يسمح بإنشاء نماذج رقمية دقيقة من البيانات الفيزيائية الموجودة، مما يمكن

Introduction Générale

Introduction Générale

Le reverse engineering des pièces mécaniques est une pratique qui consiste à analyser et à comprendre le fonctionnement, la conception et les caractéristiques d'une pièce mécanique existante en partant de son état final pour remonter à sa conception initiale. Cela implique souvent la déconstruction physique de la pièce, ainsi que l'utilisation de divers outils tels que la modélisation 3D, la numérisation, l'analyse des matériaux et des processus de fabrication.

Le reverse engineering est souvent utilisé dans divers domaines tels que l'ingénierie, la fabrication, la rétro-ingénierie, la réparation et même la conception de produits concurrents. Les techniques de reverse engineering peuvent être utilisées pour comprendre comment une pièce est fabriquée, identifier les matériaux utilisés, détecter les éventuels défauts de conception, et même reproduire la pièce ou en créer une version améliorée.

Les technologies modernes telles que la numérisation 3D et la modélisation assistée par ordinateur ont considérablement facilité le processus de reverse engineering en permettant la création de modèles numériques précis des pièces mécaniques à partir de données physiques existantes. Cela permet aux ingénieurs de travailler plus efficacement et avec une plus grande précision lorsqu'ils analysent et reconstruisent des pièces mécaniques.

Le reverse engineering, une méthode qui consiste à analyser un système industriel pour en déduire son fonctionnement, représente un outil essentiel pour la promotion de la production nationale et le développement des petites et moyennes industries, a indiqué lundi le 23 octobre 2023 à Alger le président du Conseil national économique, social et environnemental (CNESE).

La rétro-ingénierie joue un rôle essentiel dans l'industrie moderne en permettant aux entreprises de restaurer et de réparer des pièces, d'améliorer la conception des produits, d'analyser la concurrence, de faciliter le prototypage rapide et de garantir la conformité aux réglementations. Grâce à la numérisation 3D et aux outils de modélisation avancés, les ingénieurs peuvent rapidement créer des modèles CAO à partir de produits existants, identifier les faiblesses et proposer des améliorations. Cela accélère le développement de nouveaux produits, réduit les coûts et prolonge la durée de vie des équipements. En résumé, la rétro-ingénierie est un atout stratégique qui améliore la compétitivité et l'efficacité des opérations industrielles.

L'objectif de la recherche visant à scanner, modéliser et imprimer en 3D une aube de turbine est varié. Tout d'abord, il s'agit de créer une réplique précise de l'aube existante pour des besoins de réparation, de maintenance ou de remplacement, ce qui est essentiel pour réduire les temps d'arrêt et les coûts associés aux turbines. Ensuite, cette approche permet d'optimiser la conception des aubes en analysant leur géométrie et leurs performances à l'aide d'outils de modélisation avancés, conduisant potentiellement à des améliorations en matière d'efficacité énergétique et de durabilité. Enfin, l'impression 3D permet de produire rapidement des prototypes et de tester diverses conceptions avant la production finale, facilitant ainsi l'innovation et la personnalisation des pièces en fonction des besoins spécifiques des turbines et des conditions opérationnelles.

Chapitre I

Généralité sur les techniques de reverse engineering leur application à la conception des aubes de turbine à gaz

I.1.Introduction

L'ingénierie inverse d'un élément ne suit pas une procédure définie. Il existe un certain nombre d'options à prendre en compte lors de la recreation d'un composant ou d'un système. En général cependant, le but de la rétro-ingénierie est de créer un modèle géométrique tridimensionnel (3D).

À partir d'un objet physique. Ce processus ne constitue pas l'intégralité de l'ingénierie inverse, bien qu'il constitue un élément fondamental du processus dans son ensemble. Une fois le modèle CAO obtenu, il peut être utilisé pour fabriquer directement le composant ou pour améliorer la conception. (Voir la figure I.1)

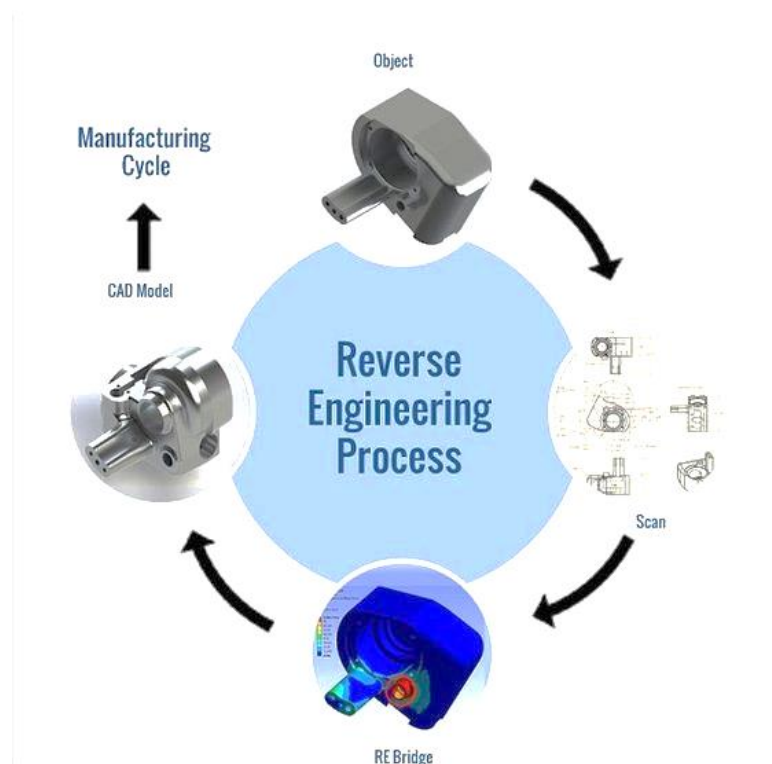


Figure I.1 Cycle de reverse engineering

Le reverse engineering, ou rétro-ingénierie, est une discipline qui consiste à déconstruire des objets physiques pour en comprendre les principes de conception, les matériaux et les processus de fabrication. Appliqué principalement dans les domaines de l'ingénierie et de la fabrication, le RE permet de reproduire, d'améliorer ou d'analyser des pièces mécaniques existantes. Cette approche est devenue indispensable pour les industries qui cherchent à maintenir la performance de leurs équipements, à prolonger la durée de vie de leurs produits et à innover sans partir de zéro.

Historiquement, le RE a été utilisé pour des raisons de maintenance et de réparation, notamment pour recréer des pièces de rechange pour des équipements obsolètes ou

indisponibles. Avec les progrès technologiques, notamment l'avènement des technologies de numérisation 3D, de la conception assistée par ordinateur (CAO) et de l'impression 3D, le RE s'est transformé en un processus hautement précis et efficient, capable de capturer des détails complexes et de produire des modèles numériques exploitables.

L'industrie moderne repose sur la précision et l'efficacité des composants mécaniques, et les aubes de turbine jouent un rôle crucial dans les systèmes de propulsion et de génération d'énergie. Les aubes de turbine, en particulier, sont des composants complexes soumis à des conditions extrêmes de température et de pression, nécessitant une conception et une fabrication précises. Le reverse engineering (RE) offre une approche efficace pour analyser, reproduire et améliorer ces composants critiques. Cette méthode permet de comprendre les caractéristiques géométriques, matérielles et fonctionnelles des aubes de turbine, facilitant ainsi leur reproduction et optimisation.

I.2.Généralités des aubes de turbine

I.2.1.Aperçu des aubes de turbine

Une turbine est un dispositif rotatif qui convertit une partie de l'énergie interne d'un fluide (liquide ou gazeux) en énergie mécanique grâce aux aubes (pales) disposées sur un arbre tournant à grande vitesse. Selon le type de fluide utilisé, appelé fluide actif ou fluide moteur, il peut s'agir d'une turbine hydraulique, d'une turbine à vapeur ou d'une turbine à gaz. Plus généralement, une turbine permet à un fluide de se dilater, captant ainsi son énergie sous forme mécanique. La figure présente un schéma général d'une turbine.

I.2.2. Turbine à gaz

Une turbine à gaz, également appelée turbine à combustion ou parfois turbine à gaz à combustion, est un type de machine tournante thermodynamique appartenant à la famille des moteurs à combustion interne. Son rôle est de produire de l'énergie thermique sous forme de rotation d'un arbre, directement à partir de l'énergie cinétique du gaz généré par la combustion d'hydrocarbures (fioul, gaz, etc.) en détente dans la turbine. Le comburant, généralement de l'air ambiant, est comprimé avant d'entrer dans la chambre de combustion à l'aide d'un compresseur rotatif entraîné par le même arbre que la turbine.

Le terme "gaz" dans l'ancien nom "turbine à gaz", largement utilisé, fait référence à la nature gazeuse des produits de la combustion, contrairement à une turbine à vapeur où le fluide de travail est de la vapeur d'eau. Dans des régions comme le Sahara ou dans l'industrie des hydrocarbures, les turbines à gaz sont couramment utilisées en raison de la disponibilité des produits de combustion gazeux.

Une turbine à réaction est une variante spécifique de la turbine à gaz qui utilise le principe de la réaction pour propulser certains types d'avions rapides.

I.2.2.1. Principe de fonctionnement les turbines

Une turbine à gaz est un moteur à combustion interne qui aspire et comprime l'air atmosphérique, généralement à l'aide de son propre compresseur. Cette compression accroît l'énergie de l'air, qui est ensuite mélangé avec du carburant dans la chambre de combustion. La combustion produit des gaz chauds à haute énergie qui passent par la turbine, où cette énergie est convertie en énergie mécanique utile. L'énergie mécanique générée est transmise à la machine réceptrice via un accouplement, permettant la production industrielle.

Aspiration : L'air ambiant est aspiré dans le compresseur.

Compression : L'air est comprimé, augmentant sa pression et sa température.

Combustion : Le carburant est injecté et brûlé avec l'air comprimé, produisant des gaz chauds.

Expansion : Les gaz chauds traversent la turbine, faisant tourner l'arbre de la turbine.

Évacuation : Les gaz d'échappement sont expulsés de la turbine.

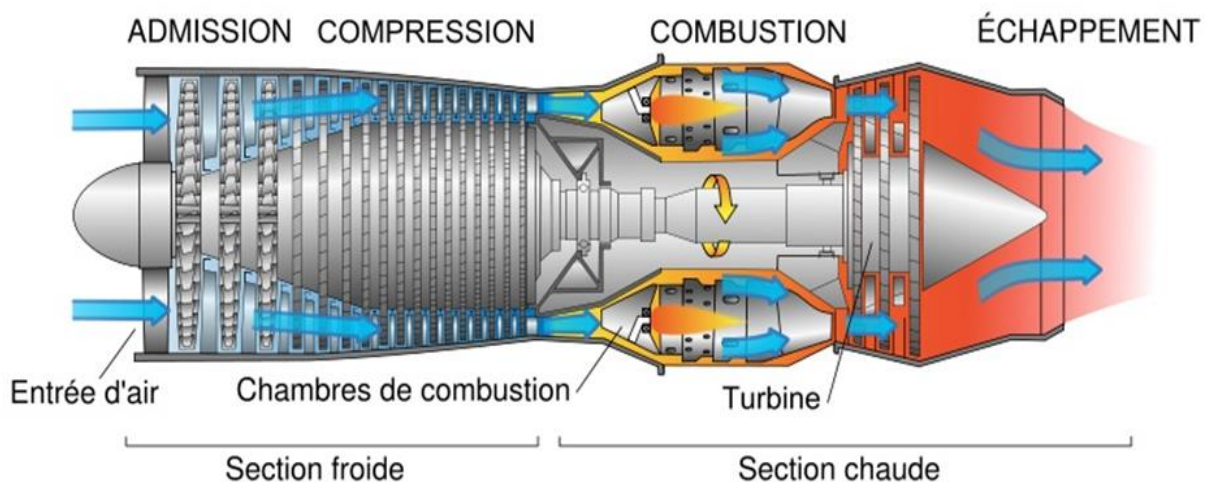


Figure I.2 Principe de fonctionnement de turbine à gaz

I.2.3. Classification de turbine à gaz

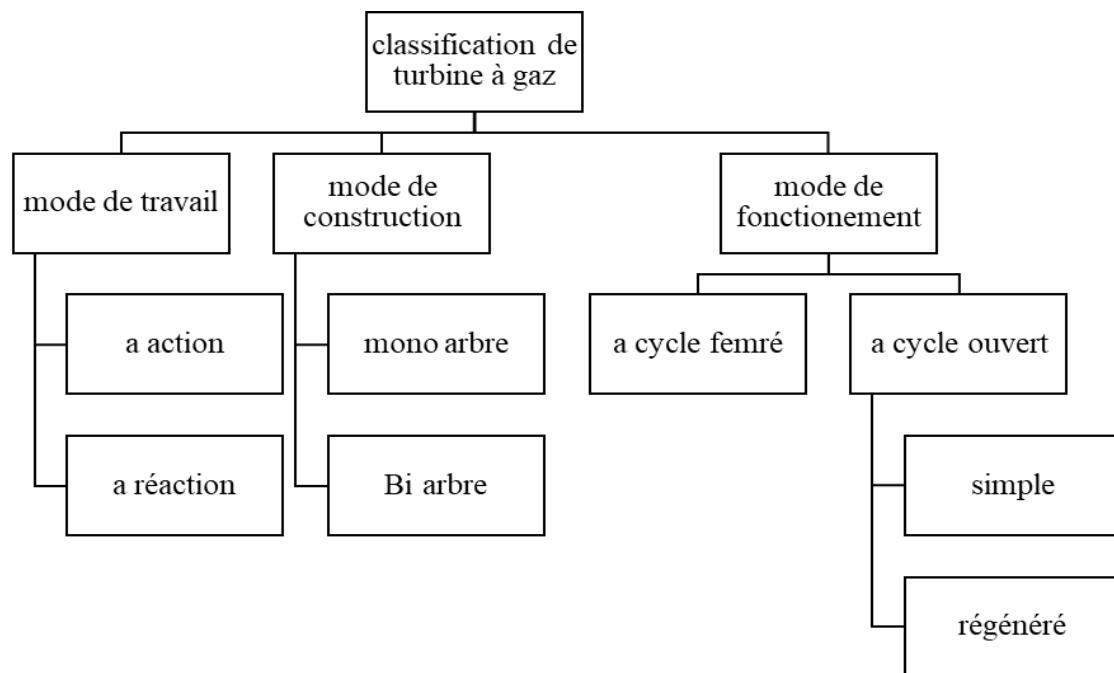


Figure I.3 Classification de turbine à gaz

I.2.4. Aubage

L'aube est une partie essentielle de la turbine, prenant la forme d'une cuillère ou d'une lame, sur laquelle agit le fluide. Une turbine possède plusieurs aubes uniformément réparties autour de sa circonférence. Ces aubes, profilées et immergées dans le flux, forment des canaux par lesquels le fluide s'écoule, assurant un débit suffisant pour produire un travail mécanique. Une aube a deux faces : la face supérieure (extrados) et la face inférieure (intrados), comme illustré dans la figure 5. La vapeur est déviée dans les rainures du rotor, créant une différence de pression entre les faces supérieure et inférieure.

Dans le fonctionnement des turbines industrielles, la génération de forces de réaction revêt une grande importance économique, nécessitant l'application de diverses disciplines comme l'aérodynamique, la résistance des matériaux, et les propriétés physiques des vibrations. Ces disciplines sont essentielles pour concevoir des aubes optimales, maximisant l'efficacité globale et le rendement des turbines.

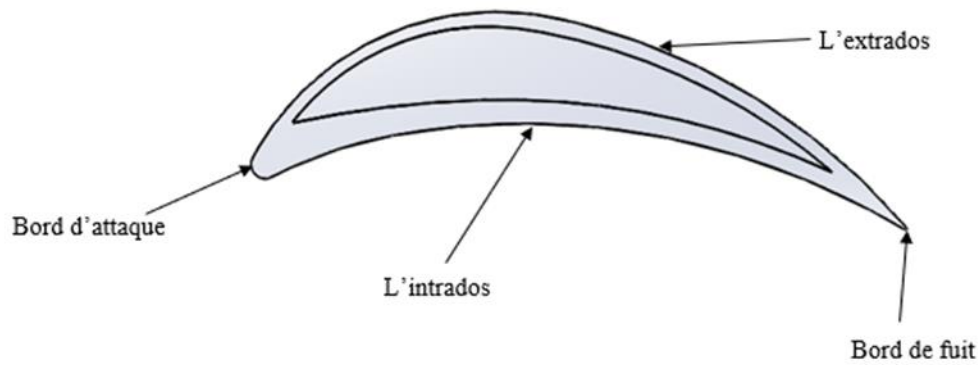


Figure I.4 Profil d'aube de turbine à gaz



Figure I.5 Différents types d'aube de turbine

I.2.5. Catégories des aubes

I.2.5.1. Aubes de rotor

À l'instar d'une aile, une aube se compose d'un bord d'attaque, d'une âme et d'un bord de fuite. Son profil est optimisé pour répondre aux exigences spécifiques de l'étage du compresseur auquel elle appartient. Les technologies de liaison entre le disque (roue) et l'aube varient en fonction des constructeurs et des compresseurs. Voici quelques-unes de ces technologies.

I.2.5.2. Aubes de stator

Tout comme les aubes de rotor (figure I.6), les pales de stator possèdent également un profil aérodynamique. De plus, l'angle d'attaque des aubes du stator peut être fixe ou variable. Ces aubes à calage variable sont montées sur le carter du stator et peuvent être ajustées autour de

leur axe pour optimiser le flux de gaz. L'angle d'attaque des aubes est contrôlé en fonction des conditions de fonctionnement par un système d'asservissement, qui commande le mouvement de la couronne tournante située à l'extérieur du carter et reliée aux aubes par des biellettes respectives. Le système d'asservissement peut être électrique, pneumatique ou hydraulique, et il est géré par l'unité de contrôle du carburant.

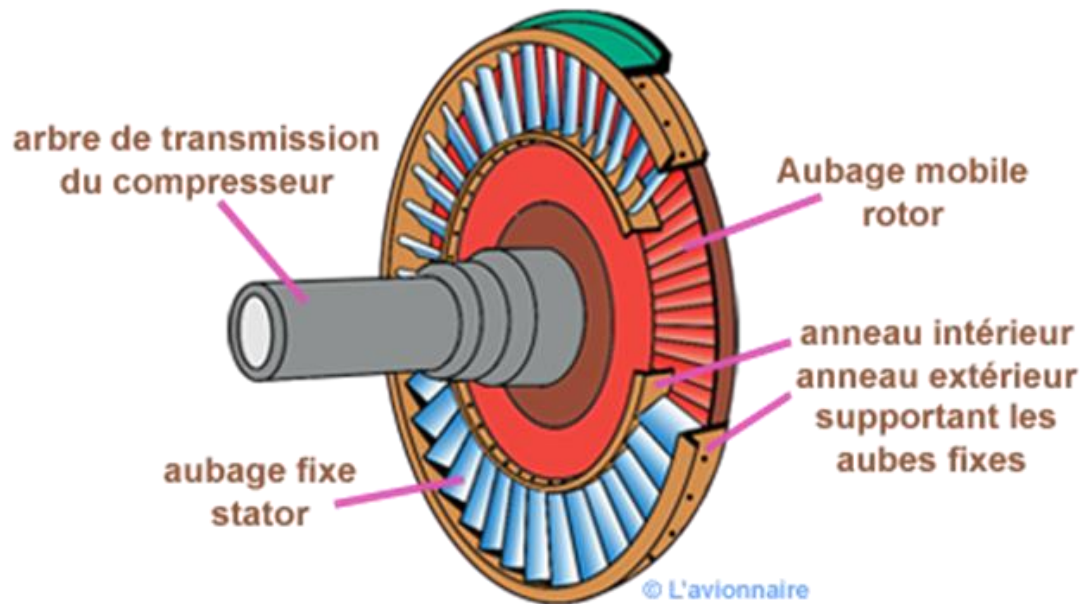


Figure I.6 Stator et rotor de l'aube de turbine

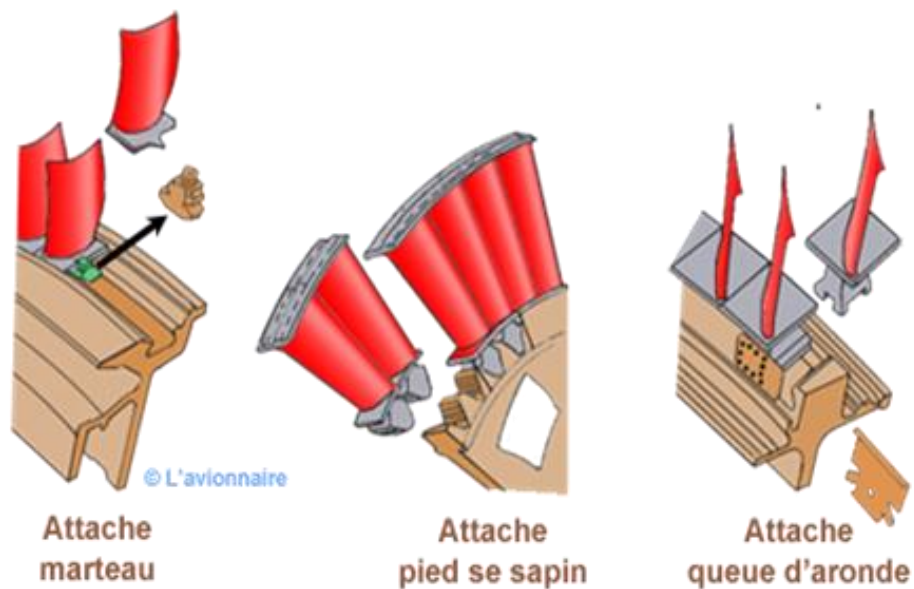


Figure I.7 Montage d'aube dans la roue du rotor

I.3. Historique et Révolution du Reverse Engineering des Pièces Mécaniques

Le reverse engineering (RE) des pièces mécaniques a évolué considérablement au fil des décennies, passant de techniques manuelles simples à des méthodes avancées utilisant des technologies de pointe. Voici une vue d'ensemble de l'histoire et de la révolution de cette discipline, accompagnée de références à des mémoires pertinents.

I.3.1. Historique et révolution du reverse engineering des pièces mécaniques

I.3.1.1. Premières techniques de reverse engineering

Le reverse engineering a des racines anciennes, remontant à l'époque où les artisans et ingénieurs recréaient des pièces existantes sans plans originaux. Les premières techniques impliquaient des méthodes de mesure manuelle avec des outils simples comme des pieds à coulisse et des micromètres.

I.3.1.2. Introduction des scanners 3D

Dans les années 1990, l'introduction des scanners 3D a révolutionné le reverse engineering. Ces dispositifs permettent de capturer des données de surface complexes et de générer des modèles numériques précis, accélérant et améliorant considérablement le processus.

I.3.1.3. Émergence de la CAO et des systèmes de mesure avancés

Avec l'avènement de la conception assistée par ordinateur (CAO) dans les années 1960 et 1970, le reverse engineering a commencé à intégrer des outils numériques. Les systèmes de mesure avancés, tels que les machines à mesurer tridimensionnelles (CMM), ont amélioré la précision et l'efficacité du processus.

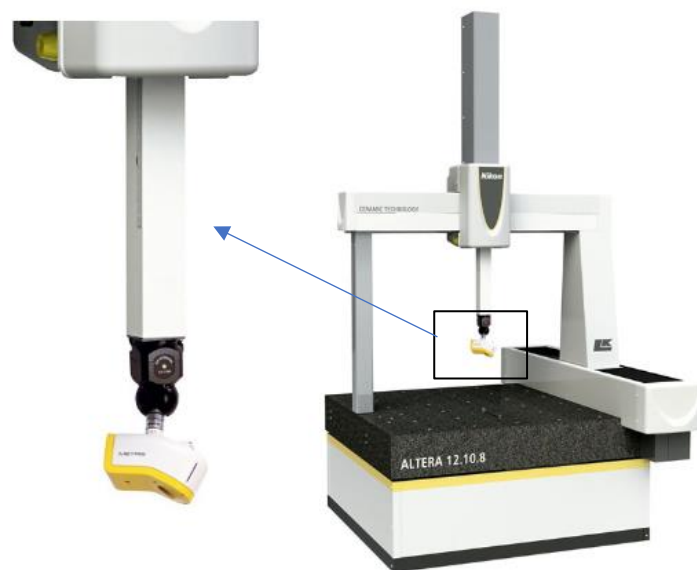


Figure I.8 Machines à mesurer tridimensionnelles avec scan (CMM)

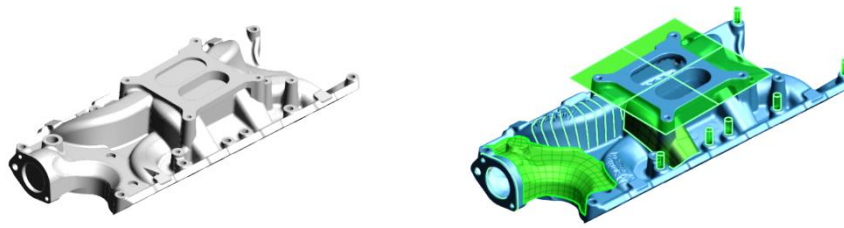


Figure I.9 Pièces mécaniques à scanner

I.3.2. Révolution du reverse engineering des pièces mécaniques

I.3.2.1. Avancées Technologiques Récentes

Les avancées technologiques récentes, notamment dans les domaines de l'impression 3D et de la fabrication additive, ont permis d'intégrer directement les modèles de reverse engineering dans les processus de production. Cela a ouvert de nouvelles possibilités pour la création rapide de prototypes et la fabrication de pièces sur mesure.

I.3.2.2. Applications élargies et nouvelles perspectives

Aujourd'hui, le reverse engineering est utilisé dans un large éventail d'industries, de l'aérospatiale à la médecine, en passant par l'automobile et l'énergie. Les nouvelles méthodes de numérisation et de modélisation 3D continuent d'évoluer, offrant des perspectives innovantes pour la conception de produits, la maintenance prédictive et la personnalisation des pièces.

I.3.2.3. Défis et perspectives futures

Malgré les progrès, le reverse engineering continue de faire face à des défis, notamment en matière de protection de la propriété intellectuelle et de gestion des données volumineuses. Les recherches actuelles se concentrent sur l'amélioration de la précision, la réduction des coûts et l'optimisation des flux de travail pour répondre aux exigences croissantes des industries modernes.

I.4. Objectifs d'application du reverse engineering dans le secteur pétrolier

L'industrie pétrolière, caractérisée par des équipements complexes et souvent soumis à des conditions extrêmes, bénéficie grandement du reverse engineering (RE). L'application du RE dans ce secteur vise à améliorer la maintenance, la réparation, la rénovation des équipements et à optimiser les processus de production. Voici un aperçu des objectifs spécifiques de l'application du RE dans l'industrie pétrolière, avec des références à des mémoires pertinents.

- **Réplication de Pièces**

L'un des principaux objectifs du reverse engineering dans l'industrie pétrolière est de recréer des pièces de rechange pour des équipements obsolètes ou discontinués. Les installations pétrolières souvent utilisent des équipements en service depuis plusieurs décennies, pour lesquels les pièces de rechange ne sont plus fabriquées

- **Réduction des Temps d'Arrêt**

Les temps d'arrêt non planifiés peuvent coûter des millions de dollars à l'industrie pétrolière. Le reverse engineering permet de réduire ces temps d'arrêt en facilitant la production rapide de pièces de rechange sur site, minimisant ainsi les interruptions des opérations.

- **Amélioration de la Performance et de la Durabilité**

Le RE permet d'analyser et d'améliorer les conceptions existantes pour augmenter la performance et la durabilité des équipements. En étudiant les pièces usées, les ingénieurs peuvent identifier les faiblesses de conception et proposer des améliorations.

- **Optimisation des Processus de Maintenance**

Le reverse engineering aide à optimiser les processus de maintenance en créant des modèles numériques détaillés des équipements. Ces modèles peuvent être utilisés pour la planification des interventions de maintenance, l'entraînement des techniciens et la réalisation de simulations.

- **Développement de Nouveaux Produits**

Le RE soutient l'innovation dans l'industrie pétrolière en permettant aux ingénieurs de partir de conceptions existantes pour développer de nouveaux produits ou améliorer les produits existants. Cela peut inclure l'adaptation des technologies modernes aux anciennes conceptions pour améliorer l'efficacité et la sécurité.

I.5.Reverse engineering : concepts et processus

I.5.1.Concepts

Le reverse engineering des pièces mécaniques implique le processus d'analyse, de décomposition et de compréhension d'une pièce existante afin de créer des modèles numériques précis et utilisables pour la fabrication, la conception ou d'autres applications. Voici un aperçu du concept et du processus de reverse engineering des pièces mécaniques.

- **Analyse détaillée**

L'analyse détaillée d'une pièce mécanique est une étape fondamentale du processus de reverse engineering. Elle consiste à examiner attentivement la pièce sous tous les angles pour comprendre sa fonction, sa structure et ses interactions avec d'autres composants. Voici quelques aspects clés de cette analyse :

- **Fonction de la pièce**

Tout d'abord, il est essentiel de comprendre la fonction principale de la pièce dans le système auquel elle appartient. Cela implique de déterminer comment la pièce contribue à la performance globale du système et à quels critères elle doit répondre pour remplir sa fonction correctement.

- **Structure et forme**

En examinant la pièce, il faut observer sa forme, sa taille, ses caractéristiques géométriques et sa structure interne. Cela inclut l'identification des surfaces de contact, des bords, des trous, des filetages, des nervures, etc. La structure et la forme de la pièce peuvent fournir des indices sur sa fabrication, son matériau et son processus de conception.

- **Matériaux et propriétés**

Il est important de déterminer le matériau à partir duquel la pièce est fabriquée, ainsi que ses propriétés physiques telles que la résistance, la ductilité, la dureté, etc. Ces informations peuvent être utiles pour choisir des méthodes de fabrication appropriées lors de la création de modèles numériques.

- **Tolérances et ajustements**

L'examen des tolérances dimensionnelles et géométriques de la pièce permet de comprendre les exigences de précision de sa fabrication et de son assemblage. Cela inclut également l'identification des ajustements entre la pièce et les autres composants avec lesquels elle interagit.

- **Interactions avec d'autres composants**

Il est important de comprendre comment la pièce interagit avec les autres éléments du système. Cela peut inclure l'examen des interfaces de montage, des liaisons mécaniques, des mouvements relatifs, etc. Comprendre ces interactions permet de concevoir des modèles numériques précis qui prennent en compte le contexte global du système.

- **Usure et détérioration**

L'examen de l'usure, de la corrosion ou d'autres formes de détérioration de la pièce peut fournir des informations sur son utilisation passée, sa durabilité et sa fiabilité. Cela peut également indiquer des zones qui pourraient nécessiter une attention particulière lors de la création de modèles de remplacement.

I.5.2. Processus d'application du reverse engineering

Le processus de reverse engineering des pièces mécaniques peut être décomposé en plusieurs étapes.

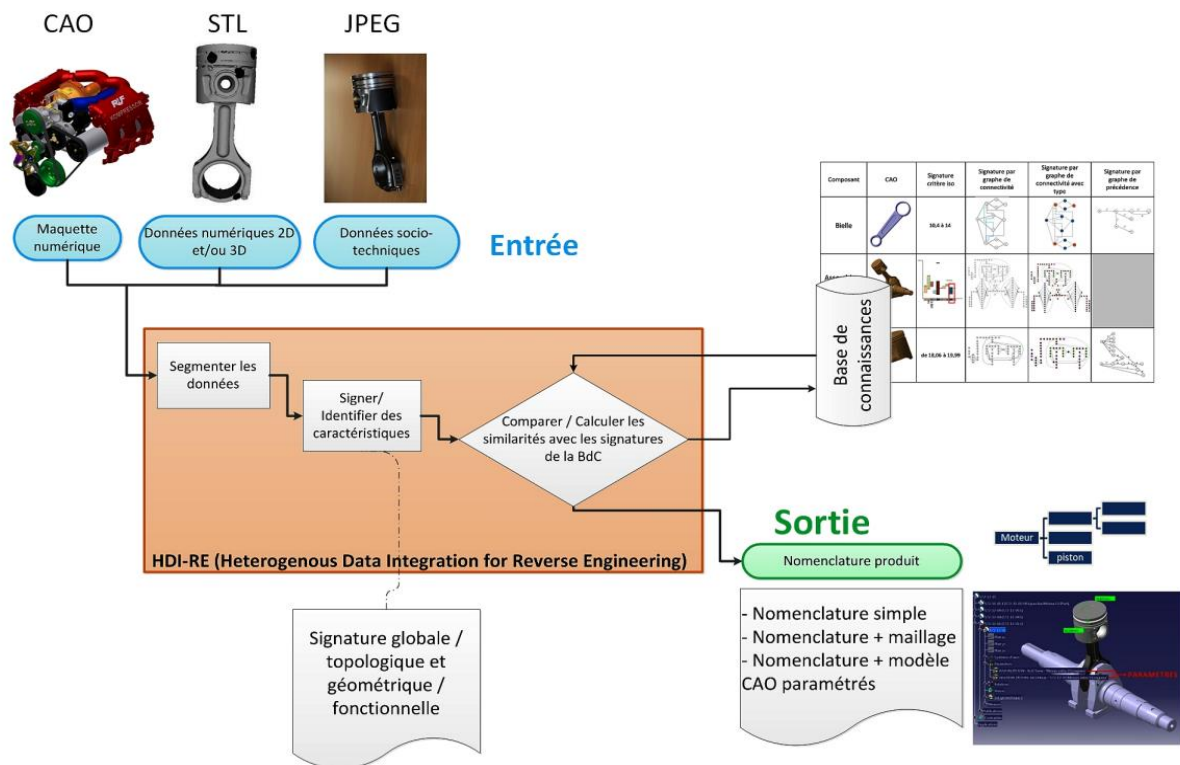


Figure I.10 Processus de Reverse engineering

- **Préparation au reverse engineering**

Collecter toutes les informations disponibles sur la pièce, telles que des dessins techniques, des spécifications, des relevés de mesure, des photographies, etc. Cette étape prépare le terrain pour le reste du processus en fournissant un contexte détaillé sur la pièce à analyser.

- **Analyse Visuelle**

Examiner la pièce pour comprendre sa forme, sa fonction et sa relation avec d'autres composants. Cette étape permet de développer une compréhension initiale de la pièce, ce qui est essentiel pour les étapes suivantes du processus.

- **Collecte de Données**

Utiliser des scanners 3D pour capturer des mesures précises de la pièce. Les scanners 3D, tels que les scanners laser ou les scanners à lumière structurée, créent une représentation numérique détaillée de la pièce, capturant sa géométrie complexe avec une haute précision.

- **Traitement des Données Numérisées**

Traiter les données de scan pour corriger les erreurs, supprimer le bruit et fusionner les différents scans partiels en un modèle 3D complet. Cette étape est cruciale pour assurer la précision du modèle CAO qui sera créé.

- **Modélisation CAO**

Utiliser des logiciels de CAO pour créer un modèle 3D détaillé de la pièce à partir des données numérisées. Cette étape peut inclure la création de surfaces, de solides et de caractéristiques géométriques précises, qui forment la base du prototype.

- **Validation**

Comparer le modèle CAO créé avec les spécifications d'origine et effectuer des ajustements si nécessaires pour garantir leur précision. Des techniques de validation, telles que l'analyse par la méthode des moindres carrés.

Préparation pour l'Impression 3D

Convertir le modèle CAO final en un format compatible avec les imprimantes 3D, tel que STL. Ajuster les paramètres d'impression pour garantir la qualité et la fidélité du prototype imprimé.

- **Impression 3D**

Imprimer le modèle en utilisant une imprimante 3D adaptée. Sélectionner le matériau d'impression en fonction des exigences spécifiques de la pièce, telles que la résistance mécanique, la précision dimensionnelle et la finition de surface.

- **Post-traitement**

Effectuer les opérations de post-traitement nécessaires, telles que le nettoyage, le polissage, et l'assemblage, pour obtenir un prototype fonctionnel.

- **Validation Finale**

Effectuer des tests de validation sur le prototype imprimé pour s'assurer qu'il répond aux spécifications et aux exigences de performance. Cette étape peut inclure des tests physiques et des inspections dimensionnelles

I.6. Avantages et inconvénients reverse engineering

I.6.1. Avantages

Le reverse engineering des pièces offre plusieurs avantages significatifs dans divers contextes industriels. Voici une analyse détaillée de ces avantages.

- **Réplication de pièces obsolètes ou indisponibles**

Dans de nombreux cas, les entreprises sont confrontées au défi de trouver des pièces de rechange pour des équipements obsolètes ou discontinués. Le reverse engineering permet de recréer ces pièces en analysant et en reproduisant leur géométrie et leurs caractéristiques fonctionnelles.

- **Réduction des coûts de remplacement**

Plutôt que de remplacer un équipement complet en raison de pièces défectueuses ou

manquantes, le reverse engineering permet de fabriquer des pièces spécifiques à moindre coût. Cela peut contribuer à des économies importantes sur les dépenses de maintenance et de réparation.

- **Adaptation aux nouveaux matériaux et technologies**

En reverse engineering, les pièces peuvent être améliorées en utilisant des matériaux plus performants ou des techniques de fabrication plus avancées. Cela permet d'optimiser les performances, la durabilité et la résistance des pièces.

- **Personnalisation et optimisation des pièces**

En analysant les pièces existantes, il est possible d'identifier des possibilités d'optimisation pour répondre à des besoins spécifiques. Cela peut inclure des ajustements de conception pour améliorer la fonctionnalité, la durabilité ou l'ergonomie des pièces.

- **Accélération du processus de développement de produits**

Le reverse engineering permet de créer rapidement des prototypes de pièces existantes ou de concepts de conception. Cela accélère le processus de développement de produits en réduisant le temps nécessaire à la conception et à la validation des pièces.

- **Gestion de l'obsolescence des pièces**

Les entreprises peuvent utiliser le reverse engineering pour anticiper et gérer l'obsolescence des pièces en développant des solutions de remplacement avant que les pièces ne deviennent indisponibles sur le marché.

- **Amélioration de la documentation technique**

Le processus de reverse engineering génère souvent une documentation détaillée des pièces, y compris des modèles 3D, des plans de fabrication et des spécifications matérielles. Cela peut améliorer la traçabilité, la maintenance et la gestion des pièces tout au long de leur cycle de vie.

I.6.2. Inconvénients

Bien que le reverse engineering des pièces puisse offrir de nombreux avantages, il comporte également certains inconvénients et défis. Voici une analyse détaillée de ces aspects négatifs :

- **Coûts élevés des équipements**

Le processus de reverse engineering peut être coûteux en raison des équipements spécialisés nécessaires, des logiciels de modélisation 3D coûteux, et de la main-d'œuvre qualifiée requise pour mener à bien les analyses et les reproductions des pièces.

- **Complexité du processus**

Le reverse engineering des pièces peut être un processus complexe et laborieux, surtout pour des pièces complexes ou présentant des géométries non standard. Cela peut nécessiter des

compétences techniques avancées et une compréhension approfondie des principes d'ingénierie.

- **Perte de propriété intellectuelle**

Lorsque des entreprises ou des individus réalisent du reverse engineering sur des pièces protégées par des brevets ou des droits d'auteur, cela peut entraîner une violation de la propriété intellectuelle. Il est essentiel de respecter les lois et les réglementations en matière de droits de propriété intellectuelle lors du reverse engineering.

- **Précision limitée**

La précision du reverse engineering dépend de la qualité des données obtenues lors de l'analyse des pièces existantes. Des erreurs de mesure ou des imperfections dans les données peuvent entraîner des inexactitudes dans les modèles 3D reproduits, ce qui peut affecter la qualité et les performances des pièces fabriquées.

- **Risques liés à la qualité**

Lorsque des pièces sont reproduites à partir du reverse engineering, il peut y avoir des variations dans la qualité et les performances par rapport aux pièces d'origine. Des défauts de fabrication ou des différences matérielles peuvent affecter la durabilité et la fiabilité des pièces reproduites.

- **Limitations matérielles et techniques**

Certaines pièces peuvent présenter des caractéristiques ou des propriétés difficiles à reproduire à l'aide des technologies d'impression 3D ou d'usinage traditionnelles. Cela peut limiter la faisabilité du reverse engineering pour certaines pièces complexes ou exotiques.

- **Durée du processus**

Le reverse engineering des pièces peut prendre du temps, en particulier pour des pièces complexes ou lorsque des ajustements et des itérations sont nécessaires pour obtenir les résultats souhaités. Cela peut entraîner des retards dans les projets de développement de produits.

I.7.Conclusion

Les aubes de turbine jouent un rôle crucial dans le fonctionnement et l'efficacité des turbines, qu'elles soient utilisées dans des applications industrielles ou aéronautiques. Leur conception sophistiquée et leur profil aérodynamique permettent de maximiser la conversion de l'énergie du fluide en énergie mécanique, tout en assurant la durabilité et la fiabilité de la machine.

Le reverse engineering (RE) des aubes de turbine est un processus précieux qui permet de reproduire, analyser et améliorer ces composants critiques. Grâce à des technologies avancées de numérisation 3D et des techniques de modélisation, le RE offre la possibilité de capturer avec précision la géométrie complexe des aubes, d'identifier les matériaux et les tolérances, et de comprendre les interactions mécaniques et thermodynamiques auxquelles elles sont

soumises.

En appliquant le reverse engineering aux aubes de turbine, il est possible de répondre à plusieurs défis industriels, tels que la reproduction de pièces obsolètes, l'amélioration des performances des turbines existantes, et l'optimisation des coûts de production et de maintenance. Cette approche contribue non seulement à la prolongation de la durée de vie des équipements, mais aussi à l'innovation continue dans la conception des turbines.

Chapitre II

Numérisation de la pièce pour l'application du reverse engineering

II.1.Introduction

Le reverse engineering, ou rétro-ingénierie, est un processus complexe et essentiel dans le domaine de l'ingénierie et de la fabrication, qui implique la création de modèles numériques à partir d'objets physiques existants. Au cœur de ce processus se trouve la numérisation des pièces, une étape fondamentale qui consiste à capturer avec précision la géométrie tridimensionnelle des composants afin de les reproduire, de les analyser ou de les améliorer.

La numérisation des pièces dans le reverse engineering repose sur l'utilisation de technologies avancées de mesure et de capture de données, permettant de transformer des objets physiques en modèles numériques exploitables. Cette étape est cruciale pour obtenir des représentations précises des formes, des dimensions et des caractéristiques des pièces, ouvrant ainsi la voie à une gamme d'applications diverses et innovantes.

Dans ce chapitre, nous explorerons les principaux aspects de la numérisation des pièces dans le reverse engineering. Nous examinerons une méthodes et technologie utilisées pour capturer les données, les avantages et les défis associés à cette technique, ainsi que l'importance de la numérisation dans la conception, la fabrication et la maintenance des composants mécaniques.

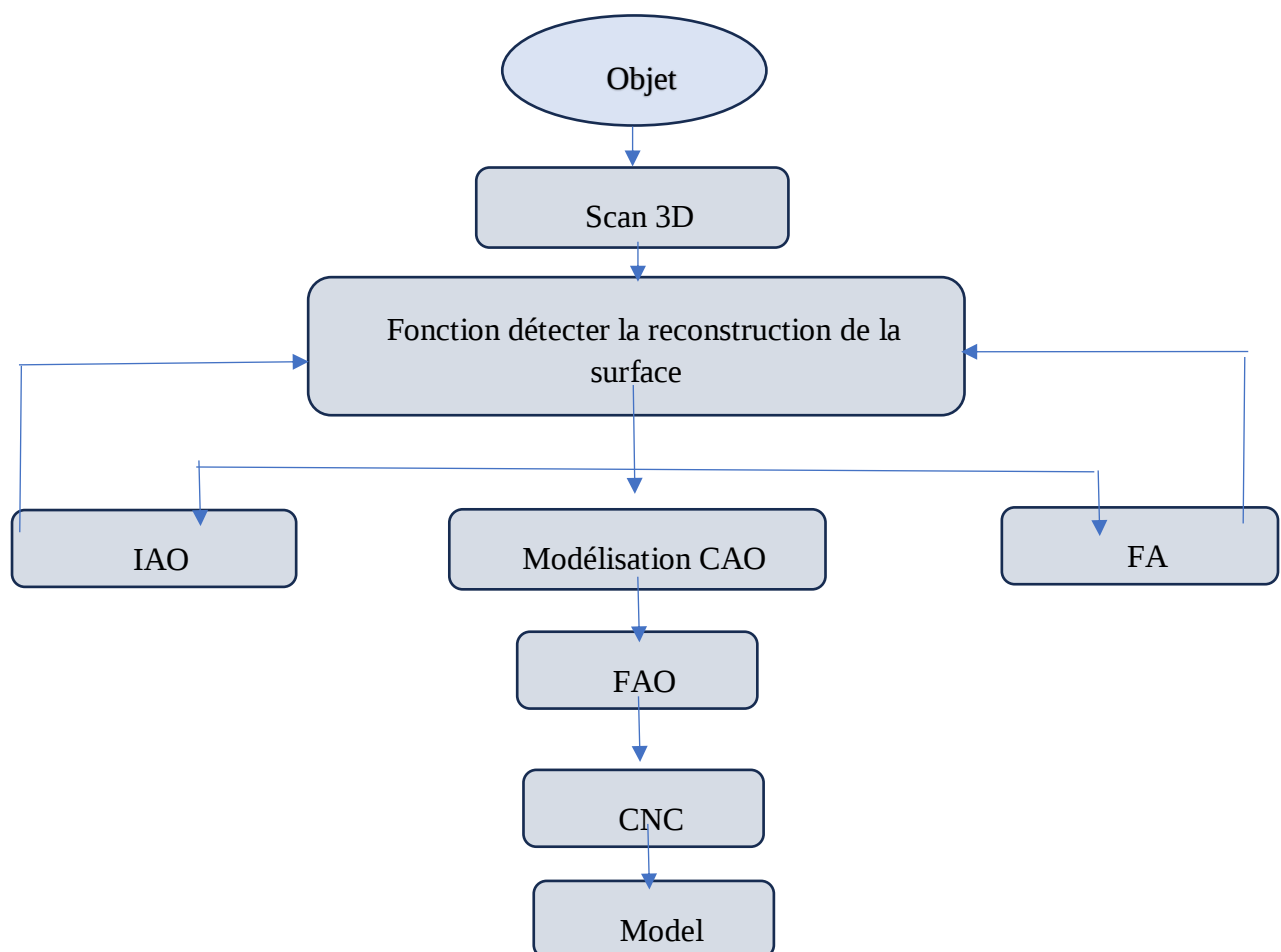


Figure II.1 Organigramme de reverse engineering

Par exemple, le modèle CAO peut être utilisé dans des applications de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Des logiciels tels que Revo Scan (Figure 2.7) permettent de scanner et numériser les pièces. L'utilisation de Revo Scan est recommandée lorsque les spécifications originales du matériau d'un composant ne sont pas disponibles, afin de scanner la pièce et d'obtenir des données précises pour éviter le risque de choisir un matériau inadapté pour la fabrication, ce qui pourrait entraîner des défaillances des composants. Une fois que la pièce est scannée et que les données sont collectées, ces informations peuvent être utilisées pour sélectionner le matériau approprié ou pour modifier le modèle CAO afin de répondre aux exigences opérationnelles des composants (figure II.1). La Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) implique l'utilisation de logiciels pour superviser les machines-outils et d'autres équipements de fabrication de pièces. Les méthodes traditionnelles telles que le fraisage par commande numérique assistée par ordinateur (CNC) sont souvent utilisées pour produire les composants nécessaires. La FAO permet de créer rapidement des prototypes de pièces qui peuvent être testés ou intégrés dans le processus de fabrication.

II.2. Techniques et des outils de numérisations dans reverse engineering

Le reverse engineering (ingénierie inverse) implique l'analyse d'un objet ou d'un système pour comprendre son fonctionnement interne, souvent pour reproduire ou améliorer le design original. La numérisation joue un rôle crucial dans ce processus, en permettant de convertir des objets physiques en modèles numériques exploitables. Voici une technique et outil de numérisation couramment utilisés dans le reverse engineering.

II.2.1. Scanner à lumière structurée

Les scanners à lumière structurée projettent des motifs de lumière sur la surface d'un objet et utilisent des caméras pour enregistrer la déformation de ces motifs. En analysant ces déformations, le scanner peut reconstruire la forme tridimensionnelle de l'objet. Cette technique est rapide et précise, ce qui en fait un choix populaire pour la numérisation d'objets de taille moyenne à grande.

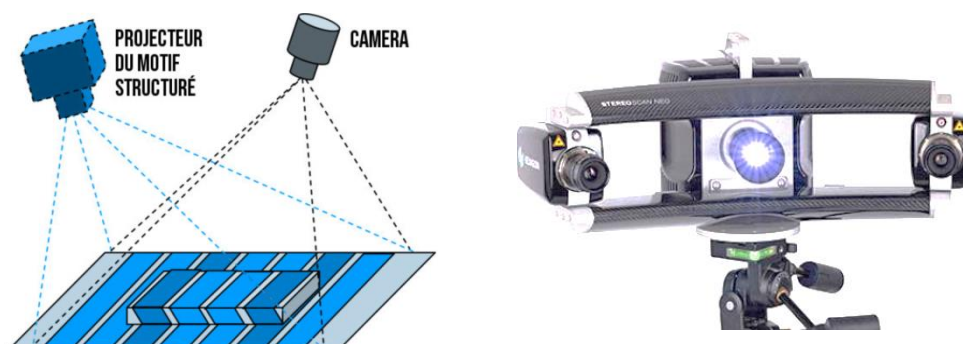


Figure II.2 Projection des rayons de la lumière et la camera de scanner 3D

II.2.1.1. Scanner REVOPOINT Mini 3D

Le Revopoint Mini utilise une technologie avancée de lumière bleue binoculaire pour projeter une lumière structurée à ultra haute résolution. Grâce à sa très haute résolution, son système de double caméra et son algorithme intelligent, il offre une modélisation extrêmement précise et détaillée. Cette précision permet aux professionnels de réaliser rapidement une reconstruction des données 3D. Avec une capture de distance des points pouvant atteindre 0.05mm et une précision d'une seule image allant jusqu'à 0.02mm, le scanner MINI 3D peut produire des modèles d'une haute précision. Tout cela est rendu possible grâce à l'utilisation d'un outil d'étalonnage professionnel de niveau industriel.

L'outil révolutionne la rétro-ingénierie des pièces mécaniques en permettant une numérisation précise et rapide des composants.

Grâce à ses algorithmes intelligents et à son balayage de précision, le MINI simplifie le processus de rétro-ingénierie en produisant des modèles 3D hautement détaillés des pièces mécaniques.

Les concepteurs et les ingénieurs peuvent utiliser l'outil pour analyser et reproduire des pièces mécaniques existantes avec une précision remarquable, accélérant ainsi le cycle de conception et de fabrication.

L'outil ouvre de nouvelles possibilités pour la rétro-ingénierie des pièces mécaniques, permettant aux fabricants de remédier rapidement aux pannes, de prolonger la durée de vie des équipements et d'optimiser les processus de production.



Figure II.3 Scanner REVOPOINT Mini 3D

Table II-1 Spécification de l'outil

Technologie	Lumière bleu à double camera
CPU	Dual-Core ARM cortex-A7
Precision de capture unique	0.02mm
Aire de capture par image	118mm *64mm (maximale quand la capture en mode excellent)
Distance de travail	100mm jusqu'à 200mm
Volume du scannage minimal	10*10*10 mm
Vitesse de scannage	Jusqu'à 10 images par secondes
Source de lumière	Lumière bleu de classe 1
Modes d'alignement	Objet, marqueur
Contrôle local	Début /pause depuis le logiciel Revo scan
Format de sortie	PLY, OBJ, STL

II.2.1.1.1.Principe de fonctionnement

Il utilise une technologie de lumière structurée à ultra haute résolution pour capturer les données 3D des objets. Dans cette technique, une lumière structurée est projetée sur la surface de l'objet, et les déformations de cette lumière sont capturées par les caméras du scanner. En analysant ces déformations, le scanner peut calculer la géométrie tridimensionnelle de l'objet avec une grande précision. Bien que la triangulation trigonométrique soit une méthode courante utilisée dans d'autres types de scanners 3D, le Revopoint Mini 3D se distingue par sa technologie de lumière structurée pour obtenir des résultats précis et détaillés.

II.2.2. Dual axis Turntable

Il semble que vous parliez du "Revopoint POP Tourbillon Colorable pour Mini Scanner 3D". Ce dispositif est une option intéressante pour ceux qui cherchent à numériser des objets avec précision et à ajouter des détails de couleur. Avec cette fonctionnalité, il devient possible de capturer non seulement la géométrie des objets, mais aussi leur apparence visuelle, ce qui est essentiel dans de nombreux domaines, notamment l'archéologie, l'ingénierie, le design de produits et bien d'autres encore.

Dual axis tourntable



Figure II.4 Une aube placée sur un Dual axis Turntable



Figure II.5 aube de turbine



Figure II.6 Installation du matériel du scan

II.2.3. Préparation l'installation le matériel de scan

Il est important de s'assurer que le Scanner MINI est connecté à l'ordinateur sur un port USB 3.0 ou supérieur. Un port USB 2.0 ne pourra fournir assez de courant électrique pour son fonctionnement optimal.

II.2.4. Exploitation du logiciel Revo scan

Il semble que vous parliez de différents logiciels associés à la numérisation d'objets en 3D avec un scanner MINI. Voici un résumé basé sur vos descriptions :

- a. Revo Scan : Ce logiciel est dédié à la numérisation des objets. Il capture les données nécessaires à la création de modèles 3D à partir de ces objets.
- b. Revo Studio : Après la numérisation avec Revo Scan, Revo Studio intervient pour le post-traitement des modèles 3D obtenus. Cela peut inclure des ajustements, des améliorations ou des modifications pour obtenir des résultats finaux satisfaisants.
- c. Revo Calibration : Ce logiciel est conçu spécifiquement pour calibrer les paramètres du scanner MINI. Son objectif est d'assurer que le scanner fonctionne avec une précision optimale, garantissant ainsi des résultats de numérisation de haute qualité.



Figure II.7 (a) (b) (c) Revo scan

II.2.4.1.Revo scan 5

Revo Scan 5 Nous avons choisi d'utiliser le scanner pour numériser notre pièce avec précision. Le Revo Scan 5 est un scanner 3D haut de gamme capable de capturer des détails fins avec une grande précision et une résolution élevée. Son système avancé de balayage permet de numériser des objets de différentes tailles et formes, en fournissant des données précises pour la modélisation 3D. (figure 2.8)

En utilisant le Revo Scan 5, nous pouvons obtenir un modèle numérique de notre pièce avec une fidélité exceptionnelle aux détails et une reproduction précise de sa géométrie. Cette numérisation nous permettra de travailler avec une représentation virtuelle de la pièce, facilitant ainsi la conception, l'analyse et la fabrication ultérieure.

Grâce à la technologie avancée du Revo Scan 5, nous sommes confiants dans notre capacité à obtenir des données de haute qualité pour notre projet, ouvrant ainsi la voie à une réalisation efficace et précise de notre mémoire sur la fabrication d'aubes de turbine en plastique à l'aide de l'impression 3D.



Figure II.8 Revo Scan 5

II.2.4.1.1.Revo Scan - Introduction à l'interface utilisateur

- **Scanner**

Accédez aux fonctions Aperçu de l'affichage, Nouvelle numérisation et Liste des modèles.

La commande 'New Scan' fait apparaître la fenêtre contextuelle de configuration.

La commande "Model List" liste la bibliothèque des numérisations stockées avec la possibilité d'effectuer diverses opérations sur des fichiers individuels.

- **Guide**

Présente le manuel de l'utilisateur, le guide de démarrage rapide et les conseils de numérisation, ainsi qu'un lien vers le dernier logiciel.

- **Support**

Fournit des liens vers l'Aide en ligne, la FAQ et le Forum, ainsi qu'un lien pour les commentaires

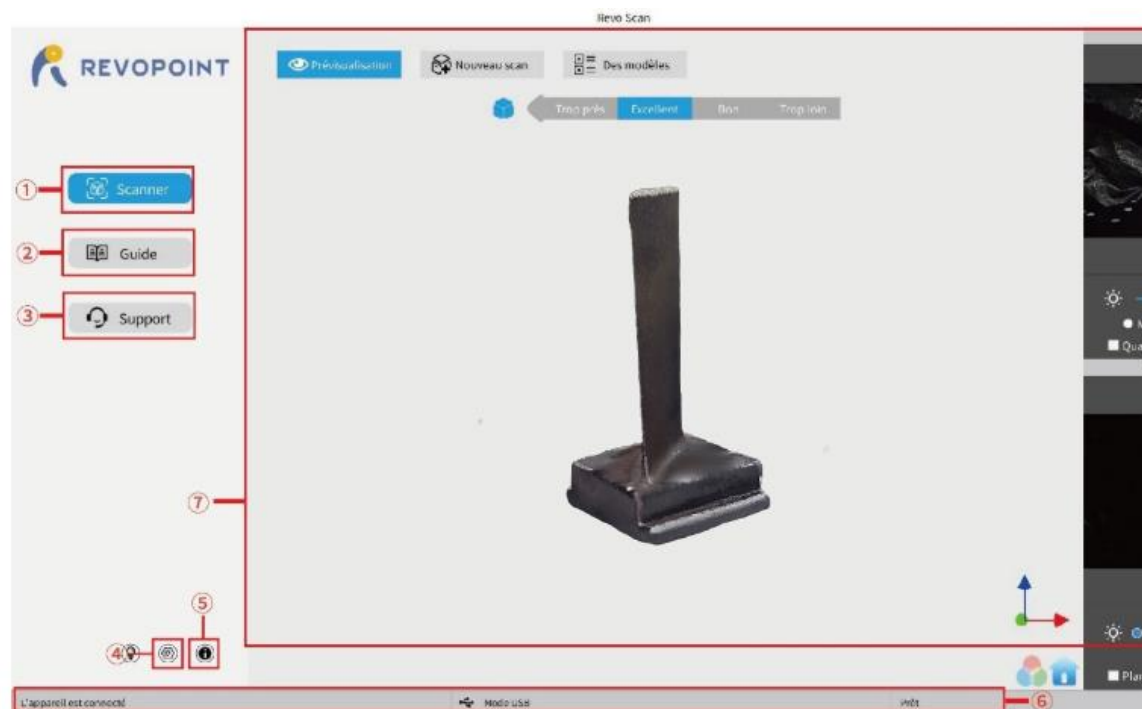


Figure II.9 Panneau du menu principal

II.2.4.1.2. Interface utilisateur de la numérisation

Après avoir cliqué sur "OK" dans la fenêtre pop-up "Nouveau Scan", l'interface utilisateur de numérisation s'affiche (figure 2.10).

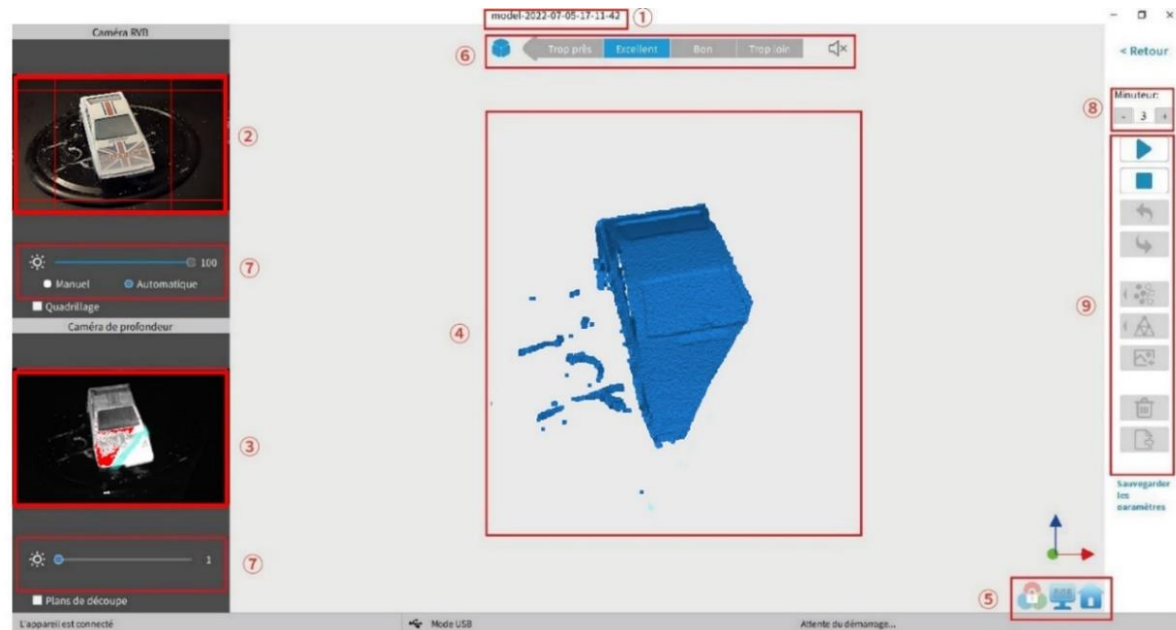


Figure II.10 Interface de la numérisation

- **Caméra RVB (2)**

Dans Revo Scan est une caméra qui capture les images en utilisant trois capteurs de couleur en rouge, vert et bleu. Ces capteurs permettent à la caméra de capturer des images en couleur en séparant la lumière dans ses composantes rouge, verte et bleue. En combinant ces trois composantes, la caméra est capable de reproduire une large gamme de couleurs dans les images capturées. Cela permet une représentation plus fidèle des scènes et des objets photographiés.

L'affichage de l'image capturée par la caméra RVB (Figure 2.10)

L'option Grille permet de positionner l'objet à numériser de manière à ce que les caméras puissent le voir.

- **Caméra de profondeur (3)**

Affiche les données du nuage de points 3D qui peuvent être capturées avec le paramètre d'exposition actuel.

L'option Couper le plan est conçue pour supprimer du nuage de points résultant les plans indésirables de la scène, tels que le plateau tournant, le bureau ou le sol. Les objets présentant des zones plates importantes peuvent tromper cet outil, il peut donc être nécessaire de décocher cette option.

- **Fenêtre de prévisualisation du modèle 3D (4)**

Affiche les données du modèle 3D qui seront capturées au début de la numérisation ou toutes les données qui ont été capturées après le début de la numérisation. La vue du modèle peut être déplacée ou agrandie dans la zone d'aperçu du modèle 3D à l'aide de la souris (bouton

gauche de la souris : rotation du modèle. Molette : zoom avant/arrière).

- **Barre d'outils (5)**

L'icône qui vient à droite Réinitialise la vue du modèle à la position par défaut dans la zone de prévisualisation du modèle 3D.

Cette position est déterminée par les premières images numérisées de l'objet.

L'icône qui vient au milieu pour Masquer ou afficher l'arrière-plan dans la fenêtre d'aperçu du modèle 3D.

L'icône qui vient sur la gauche pour Passez d'un affichage de données de nuages de points en couleur à un affichage sans couleur.

Si Aucune couleur n'a été spécifiée dans la fenêtre contextuelle de configuration de Nouveau Scan, l'icône est affichée comme verrouillée.

- **Distance du scan (6)**

Trop près, Excellent, Bon, Trop loin.

En plaçant le POP/MINI ou l'objet à numériser de manière à ce qu'il se trouve dans la zone D'excellence, Nous obtiendrons le meilleur équilibre entre la résolution et le suivi.

En ajustant la distance optimale en fonction de l'invite. Il est possible de réaliser des numérisations à plus haute résolution dans la zone "Trop près", mais il est plus probable que le suivi soit perdu. (Figure II.9)

- **Ajustement de l'exposition et du gain (7)**

La luminosité et le gain (l'icône du soleil) peuvent être réglés manuellement pour obtenir les meilleurs résultats (les zones non affichées en rouge renverront des données de nuage de points pendant le balayage). Certains modes de numérisation permettent un ajustement automatique pour trouver le meilleur réglage, mais nous n'oublions pas de passer en mode manuel avant de numériser pour éviter les variations d'exposition qui interfèrent avec la

Capture des données. (Figure II.11)

- (1) sous exposition
- (2) Surexposition (en rouge)
- (3) Exposition Parfaite

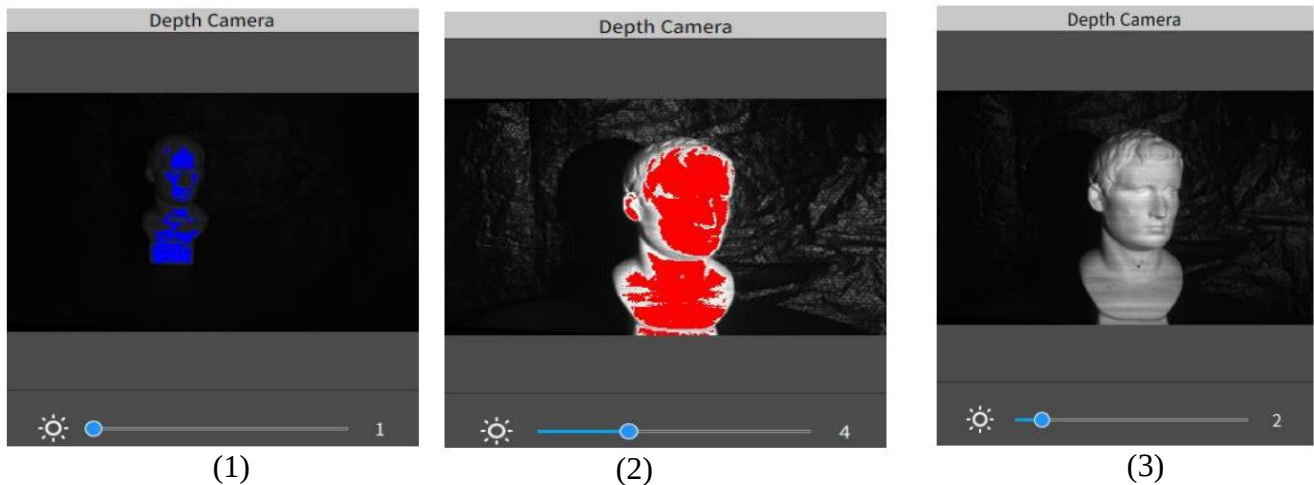


Figure II.11 (1) (2) (3) exposition de la pièce sur le scanner

- **Compte-à-rebours (8)**

Compte à rebours à partir d'un nombre arbitraire (par défaut, 3 secondes) pour indiquer le temps restant avant la numérisation.

- **Boutons de fonctions (9)**

Icône (1) : Démarrer ou mettre en pause le scannage.

Icône (2) : Arrêtez le projet de numérisation en cours. Une fenêtre contextuelle vous permet de choisir entre l'achèvement de la numérisation (fusion du nuage de points) ou la suppression de l'ensemble du projet pour recommencer.

Icône (3) : Défaire ou refaire plusieurs images numérisées du modèle à la fois.

Maillage (4) : Transpose les données du nuage de points 3D numérisé en plans ou en triangles.

Si l'option "Pas de couleur" a été sélectionnée lors de la définition du mode de numérisation, le modèle se compose uniquement des informations du nuage de points et du maillage.

Si l'option "Couleur" a été sélectionnée, le modèle contiendra également les informations de couleur de chaque point.

Texture (5) : Faites correspondre les pixels de l'image sur le modèle maillé pour améliorer la résolution de la texture et des couleurs.

Export (6) : Exportez le modèle 3D terminé.

II .2.4.2 Revo Scan -Schéma des étapes à suivre

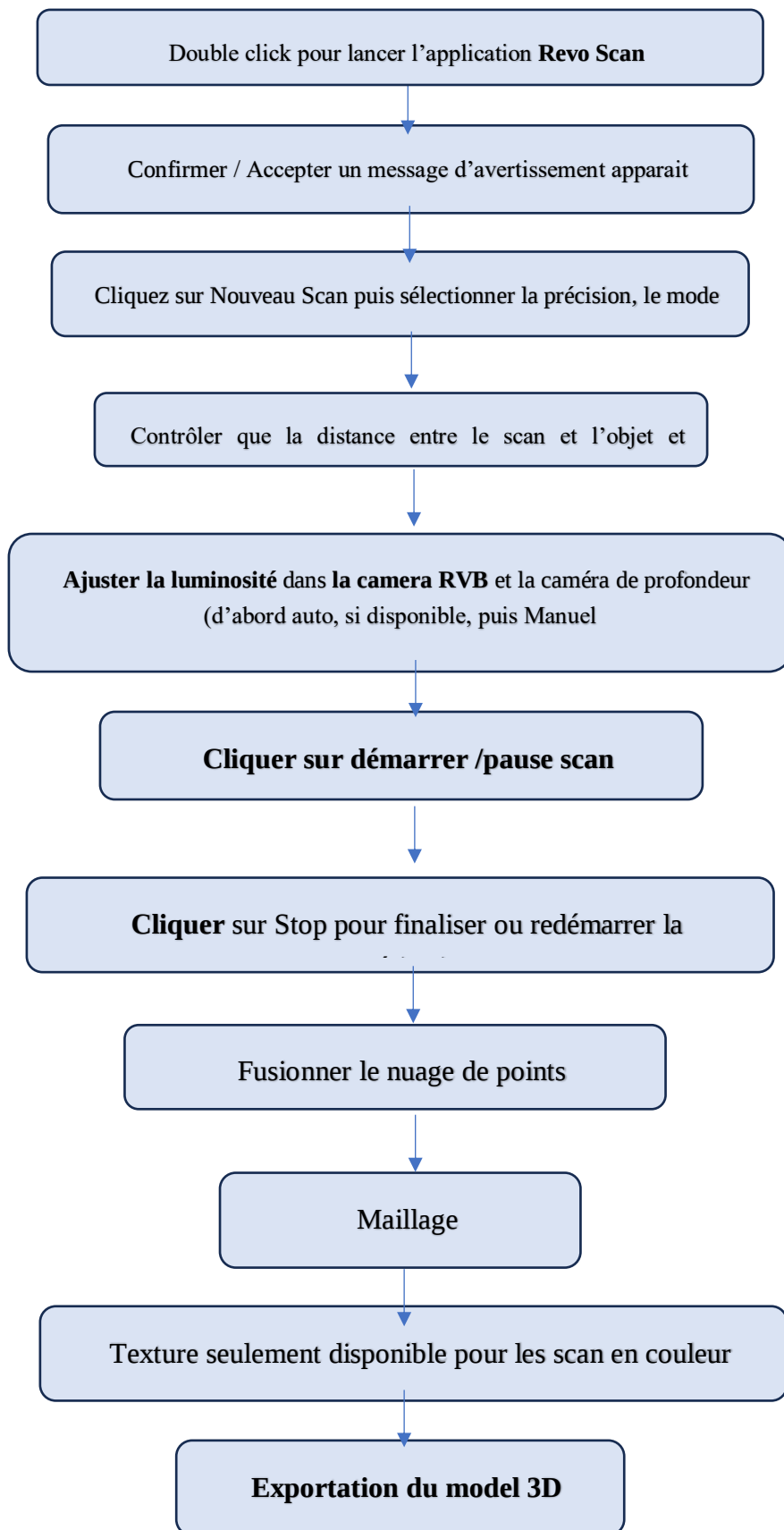


Figure II.12 Schéma des étapes à suivre

II.3. Post-traitement des données de numérisation Par REVO SCAN 5

La fusion du nuage de points est une étape cruciale dans le processus de post-traitement des données de numérisation, où l'objectif est de créer un modèle 3D cohérent et complet de l'objet scanné à partir des multiples nuages de points générés par les scans individuels. Voici un aperçu détaillé de cette phase.

II.3.1. Nuages de points individuels

Tout d'abord, chaque scan génère un nuage de points représentant la surface visible de l'objet depuis le point de vue de ce scan. Ces nuages de points sont des ensembles de coordonnées tridimensionnelles (x, y, z) qui décrivent la position spatiale des points de surface. (figure 2.13)

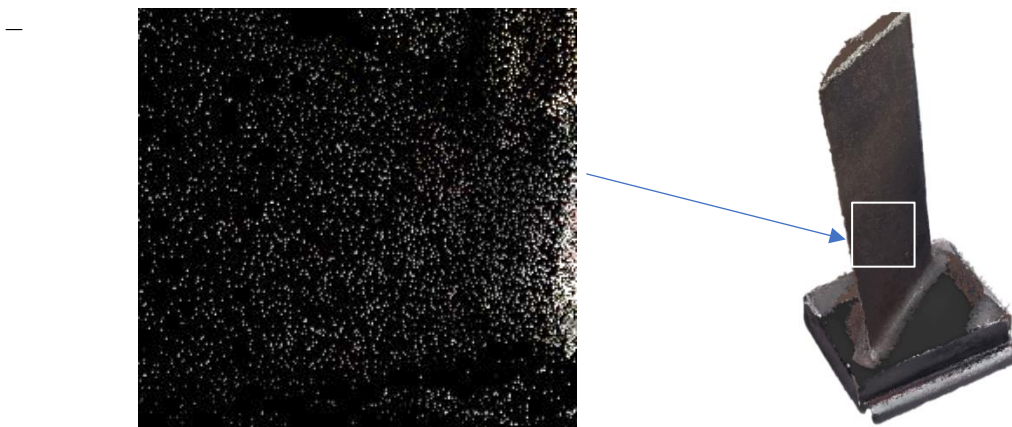


Figure II.13 Nuage de points capturé

II.3.2. Alignement initial

Avant la fusion, les nuages de points individuels doivent être alignés dans un même système de coordonnées de référence. Cela peut être réalisé en utilisant des repères de référence identifiables dans la scène ou en utilisant des algorithmes d'alignement automatique basés sur des caractéristiques communes entre les nuages de points.

II.3.3. Fusion des nuages de points

Une fois que les nuages de points sont correctement alignés, la fusion consiste à combiner

ces ensembles de points en un seul nuage de points global qui représente l'ensemble de la surface de l'objet. Cela peut être fait en ajoutant les points de chaque nuage de points à l'ensemble global tout en évitant les duplications.

II.3.4. Élimination des doublons

Pendant la fusion, il est important d'éliminer les points redondants qui se chevauchent entre les différents nuages de points. Cela garantit que chaque point du nuage de points final contribue de manière unique à la représentation globale de la surface de l'objet.

II.3.5. Correction des défauts

Après la fusion, des défauts tels que des trous, des zones mal numérisées ou des erreurs de géométrie peuvent être présents. Le post-traitement implique de corriger ces défauts en remplissant les lacunes, en lissant les surfaces ou en ajustant les contours pour correspondre aux spécifications requises. (Figure 2.14)



Figure II.14 Correction primaire des défauts de la pièce

II.3.6. Optimisation de la géométrie

Selon les besoins, la géométrie de la pièce peut être optimisée pour améliorer sa forme, sa taille ou d'autres caractéristiques. Cela peut inclure des opérations telles que le redimensionnement, le lissage ou la simplification de la géométrie.

II.3.7. Validation et ajustements finaux

Une fois la fusion complétée et le nuage de points nettoyé, une validation finale est effectuée pour s'assurer que le modèle résultant correspond fidèlement à la géométrie de l'objet scanné. Des ajustements manuels peuvent être nécessaires pour corriger les erreurs ou les incohérences restantes.

Le fichier du notre model du scan en format PLY, il faut le rendre en format STL pour l'empoter

Dans notre logiciel de modélisation dans le chapitre 3.

II.4. Avantages de la numérisation dans RE

La numérisation dans le reverse engineering (RE) offre de nombreux avantages, mais présente également quelques inconvénients. Voici une analyse détaillée Avantages et inconvénients de la numérisation dans le reverse engineering.

II.4.1. Avantages

- **Précision et Détail**

Les technologies de numérisation comme les scanners laser 3D et les systèmes de tomographie par ordinateur (CT) offrent une précision très élevée, permettant de capturer des détails fins et complexes d'un objet.

- **Efficacité et Rapidité**

Les méthodes de numérisation permettent de capturer rapidement les données d'un objet, accélérant ainsi le processus de reverse engineering par rapport aux méthodes manuelles.

Exemple : Un scanner 3D peut numériser une pièce en quelques minutes, alors que la mesure manuelle prendrait des heures.

- **Réduction des Erreurs Humaines**

Avantage : La numérisation automatique réduit les erreurs potentielles associées aux mesures manuelles.

Exemple : Les logiciels de traitement de données peuvent automatiquement corriger les anomalies et aligner les scans pour une reconstruction précise.

- **Facilitation de la Modélisation CAO**

Les modèles 3D obtenus peuvent être directement utilisés dans des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) pour l'analyse, la modification, et la reproduction.

Exemple : Un modèle numérisé peut être importé dans SolidWorks pour une modification ou une optimisation facile.

- **Archivage**

Les modèles numériques peuvent être stockés et archivés pour une utilisation future, permettant une documentation complète et précise des objets.

Exemple : Les musées utilisent la numérisation 3D pour documenter et préserver des artefacts historiques sans les manipuler physiquement.

II.5.Conclusion

La numérisation des pièces constitue une étape indispensable dans le processus de reverse engineering, jouant un rôle crucial dans la conversion des objets physiques en modèles numériques précis et exploitables. À travers l'utilisation de technologies avancées telles que les scanners 3D, la photogrammétrie et assistée par ordinateur, il est possible de capturer avec une grande précision les dimensions, les formes et les caractéristiques internes des composants mécaniques.

Malgré les défis, les bénéfices de la numérisation dans le reverse engineering sont indéniables. En permettant une analyse détaillée et une reproduction fidèle des pièces mécaniques, la numérisation ouvre la voie à des améliorations continues et à des innovations significatives dans divers secteurs industriels. Elle contribue également à prolonger la vie des équipements et à optimiser les processus de fabrication et de maintenance.

Cette méthode est une composante essentielle du reverse engineering qui transforme la manière dont les ingénieurs et les fabricants abordent la conception, la production et l'entretien des composants mécaniques. En surmontant les défis et en exploitant pleinement les avantages offerts par les technologies de numérisation, les industries peuvent améliorer leur efficacité, réduire leurs coûts et stimuler l'innovation.

Chapitre III

Modélisation de l'aube de turbine à gaz à l'aide des outils de CAO

III.1. Introduction

La Conception Assistée par Ordinateur (CAO) est une technologie essentielle dans les domaines de l'ingénierie et de la conception, permettant de créer, modifier, analyser et optimiser des modèles numériques. La CAO joue un rôle central dans le module de modélisation, fournissant des outils sophistiqués pour la représentation géométrique précise des objets en deux et trois dimensions. Depuis ses débuts dans les années 1960, la CAO a transformé le processus de développement de produits, passant de simples dessins techniques à des simulations complexes et des analyses de performance.

Les logiciels de CAO offrent une gamme de fonctionnalités essentielles pour la modélisation, y compris la création de géométries, l'assemblage de composants, la simulation des conditions réelles et l'analyse de la durabilité et des performances. Ces outils permettent aux ingénieurs de visualiser leurs conceptions de manière détaillée et réaliste, facilitant ainsi la détection et la correction des erreurs avant la phase de fabrication.

De plus, la CAO génère une documentation technique exhaustive, nécessaire pour la production et la maintenance des produits. Elle améliore également la collaboration entre différentes équipes de projet en permettant le partage et la modification des modèles numériques par plusieurs utilisateurs. L'intégration de la CAO avec d'autres systèmes comme la fabrication assistée par ordinateur (FAO) et la gestion du cycle de vie des produits (PLM) assure une transition fluide du concept à la production.

En somme, la CAO dans le module de modélisation est un outil indispensable qui améliore la précision, l'efficacité et l'innovation dans la conception de produits. Elle permet de réduire les coûts et les délais de développement tout en augmentant la qualité et la fiabilité des produits finis.

III.2. Notion de modélisation

La modélisation est un processus fondamental dans de nombreux domaines scientifiques, techniques et artistiques, visant à représenter de manière abstraite et simplifiée des systèmes réels ou imaginaires. Elle permet de comprendre, d'analyser, de prédire et de communiquer des aspects complexes de la réalité en utilisant des modèles qui peuvent être mathématiques, physiques, informatiques ou graphiques. Les modèles servent de moyens pour explorer des hypothèses, tester des scénarios, et prendre des décisions informées basées sur des simulations et des analyses.

Les données brutes obtenues à partir du scannage contiennent des milliers, voire des millions de points. Ces points doivent être traités pour créer un modèle utilisable dans un logiciel de CAO. Les étapes suivantes sont généralement suivies pour Éliminer les bruits et les points erronés et Réduire le nombre de points tout en préservant la géométrie essentielle de l'objet.

Pour créer un modèle CAO précis de l'aube de turbine, On peut faire la modélisation par l'outil du logiciel qui fonctionne selon le principe de la méthode des moindres carrés est utilisée pour ajuster une surface mathématique (comme la ligne, des cercle, splines, surfaces gauches).

III.2.1. Nuage de points et scan

Un nuage de points est une représentation tridimensionnelle d'objets ou d'espaces obtenue grâce à des technologies comme la photogrammétrie, la numérisation au laser ou les capteurs 3D. Essentiel dans le domaine des modèles 3D, il permet de capturer la géométrie et l'apparence des objets du monde réel. Chaque point dans ce nuage a des coordonnées (x, y, z) qui indiquent sa position dans l'espace, fournissant ainsi les données nécessaires pour reconstruire et visualiser la forme et la texture d'un objet en numérique. En capturant de nombreux points répartis dans l'espace et en représentant les couleurs et textures des surfaces scannées, on peut recréer un environnement avec une fidélité impressionnante. Ce procédé peut être comparé à une photographie tridimensionnelle, avec l'avantage de pouvoir être manipulé numériquement. La collecte de données par cette méthode évite les erreurs courantes des techniques traditionnelles, comme la mesure manuelle ou l'interprétation subjective, assurant une meilleure cohérence des modèles générés. De plus, les informations numérisées restent accessibles et modifiables à tout moment, telles qu'elles étaient lors de la capture, facilitant leur consultation, révision et modification à n'importe quelle étape du processus créatif ou de travail avec les modèles 3D.

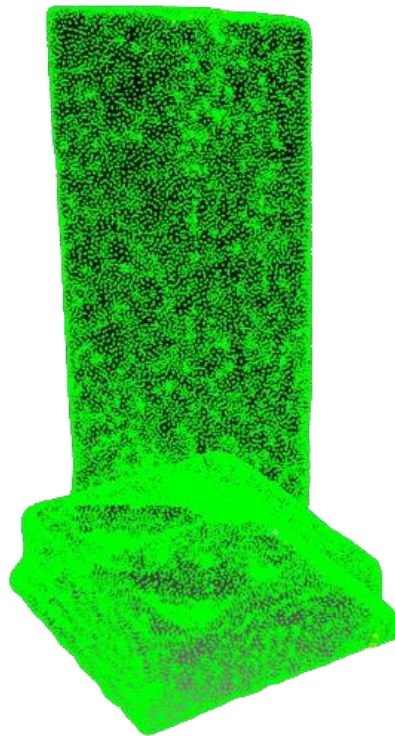


Figure III.1 nuage de points de l'aube

III.2.2. Filtrage de nuages de points

Le filtrage de points est une étape cruciale dans le traitement des nuages de points tridimensionnels. Lors de la capture de données à partir de technologies telles que la photogrammétrie ou la numérisation au laser, il est courant d'obtenir un grand nombre de points, parfois incluant des données indésirables ou bruitées. Le filtrage de points consiste à nettoyer ces données en éliminant les points redondants, les erreurs de mesure ou les artefacts qui pourraient compromettre la qualité du modèle 3D final.

Il existe plusieurs techniques de filtrage de points, allant des méthodes simples basées sur des seuils de distance ou d'intensité à des approches plus avancées faisant appel à des algorithmes de détection de motifs ou d'apprentissage automatique. Ces techniques visent à identifier et à supprimer les points aberrants tout en préservant ceux qui sont pertinents pour la reconstruction de la surface ou la représentation de l'objet scanné.

On utilisant les outils disponibles dans le (Digitized Shape Editor) pour nettoyer et filtrer le nuage de points. Puis on va supprimer les points parasites ou le bruit en utilisant les fonctionnalités (Filter) et (Remove). Cela améliorera la qualité des données et facilitera les étapes ultérieures.

Si le nuage de points est trop dense, vous pouvez réduire sa densité en utilisant l'outil (Decimate). Réduire le nombre de points simplifie le modèle et réduit le temps de traitement tout en préservant la forme générale de l'objet.

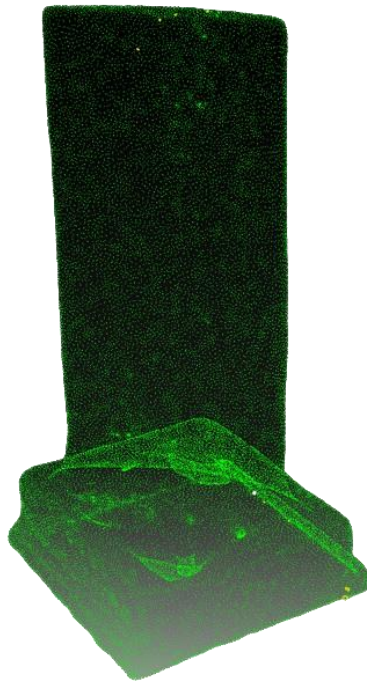


Figure III.2 Nuage de points d'aube après le filtrage.

III.2.3. Format SLDPRT

Le format SLDPRT est un format de fichier utilisé par le logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) SolidWorks, développé par Dassault Systèmes. Ce format est conçu pour stocker des modèles 3D de pièces individuelles, incluant leur géométrie, propriétés matérielles, caractéristiques de fabrication, et autres métadonnées. Les fichiers SLDPRT exploitent la modélisation paramétrique, permettant des modifications rapides et faciles des dimensions et relations des éléments du modèle. Ils sont utilisés pour créer des assemblages (SLDASM) dans SolidWorks, où plusieurs pièces sont combinées pour former un modèle complet. Ces fichiers supportent des analyses et simulations telles que l'analyse de contraintes, la dynamique des fluides et les tests de résistance des matériaux, aidant à vérifier les performances avant la fabrication. Bien qu'optimisés pour SolidWorks, les fichiers SLDPRT peuvent être exportés vers des formats universels comme STEP ou STL, facilitant l'interopérabilité et la collaboration entre différentes équipes ou logiciels. En résumé, le format SLDPRT est essentiel pour la modélisation détaillée de pièces 3D, la conception, la modification, l'analyse et la simulation dans un environnement de CAO.

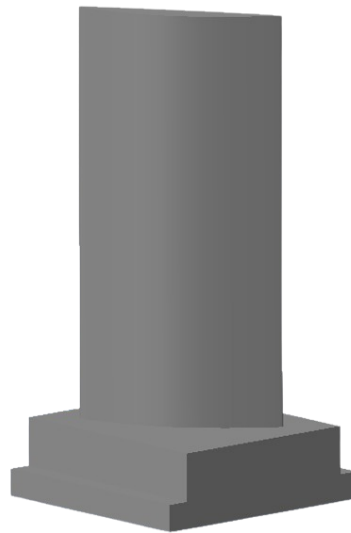


Figure III.3 modèle SLDPRT

III.2.4. Format XYZ

Le format XYZ est un type de fichier utilisé pour représenter des coordonnées spatiales d'un ensemble de points dans un espace tridimensionnel. Chaque fichier contient des lignes de texte où chaque ligne représente un point unique avec ses coordonnées cartésiennes X, Y et Z, séparées par des espaces, des virgules ou d'autres délimiteurs. Utilisé couramment dans la numérisation 3D, la modélisation 3D et la topographie, ce format est simple et facile à lire ou à générer par des machines. De nombreux logiciels de traitement 3D supportent l'importation

et l'exportation des fichiers XYZ, bien qu'ils ne contiennent généralement pas de métadonnées, comme les informations sur le capteur ou la précision. La simplicité et l'efficacité du format XYZ en font un choix populaire pour le stockage et la manipulation de données de coordonnées tridimensionnelles.

III.2.5. Format STL

STL, abréviation de Stéréo Lithographie, est un format de fichier ou une extension créée par 3D Systèmes pour son logiciel de CAO, et il est également pris en charge par de nombreux autres logiciels. Qu'il s'agisse d'outils de CAO ou d'édition de maillages, ce format décrit les surfaces du modèle par de petits triangles. Le format STL est l'un des formats de fichiers les plus couramment utilisés pour l'impression 3D, le prototypage rapide et la fabrication assistée par ordinateur.

Le modèle au format STL est généralement obtenu par triangulation d'un modèle exact à l'aide d'un logiciel de CAO, qui génère un fichier au format STL. Ce fichier contient les sommets (vertex1 X1 Y1 Z1) et la normale (face normal1 n1, n2, n3) orientée vers l'extérieur pour chaque triangle.



Figure III.4 Format STL (triangulation)

III.3. Méthode des moindres carrés

La méthode des moindres carrés est une technique statistique essentielle utilisée pour ajuster divers types de modèles à un ensemble de données observées. Elle vise à minimiser la somme des carrés des écarts, ou résidus, entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le

modèle. Cette méthode trouve des applications dans de nombreux domaines tels que la physique et l'ingénierie. Nous aborderons ici l'utilisation de la méthode des moindres carrés pour ajuster des modèles spécifiques : une droite, un cercle, une courbe quelconque et une surface gauche.

On va utiliser aussi le logiciel python pour faire des exemples de modélisation 2D et 3D par méthode moindre carrée.

III.3.1. Exemple de méthodes moindre carré 2d

III.3.1.1. Ajustement d'une Droite en 2D

Considérons un ensemble de données (x_i, y_i) pour $i=1,2,\dots,n$, où x_i représente les valeurs des prédictors et y_i représente les valeurs observées de la réponse. Le but de la régression linéaire est de trouver une droite de la forme.

$$y = B_0 + B_1x \dots\dots\dots(1)$$

Où B_0 est l'ordonnée à l'origine et B_1 est la pente.

La méthode des moindres carrés consiste à minimiser la somme des carrés des écarts (ou résidus) entre les valeurs observées y_i et les valeurs prédites $\hat{y}_i$.

$$\hat{y}_i = B_0 + B_1x_i \dots\dots\dots(2)$$

Matériellement, nous voulons minimiser la fonction suivante

$$S(B_0, B_1) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (B_0 + B_1x_i))^2 \dots\dots\dots(3)$$

Pour trouver les valeurs optimales de B_0 et B_1 , nous dérivons $S(B_0, B_1)$ par rapport à B_0 et B_1 et nous égalons ces dérivées à zéro.

Les dérivées partielles sont

$$\frac{\partial S}{\partial B_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - B_0 - B_1x_i) \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{\partial S}{\partial B1} = -2 \sum_{i=1}^n xi (yi - B0 - B1xi) \dots \dots \dots (5)$$

En égalant ces dérivées à zéro, nous obtenons le système d'équations suivant

$$B1 = \frac{n \sum_{i=1}^n xiyi - \sum_{i=1}^n xi \sum_{i=1}^n yi}{n \sum_{i=1}^n xi^2 - (\sum_{i=1}^n xi)^2} \dots \dots \dots (6)$$

$$B0 = \frac{n \sum_{i=1}^n yi - B1 \sum_{i=1}^n xi}{n} \dots \dots \dots (7)$$

- **Exemple pratique**

Supposons un petit ensemble de données avec $n=3$

Table III-1 Variables xi yi

xi	yi
1	2
2	3
3	5

1 calcule des sommes nécessaires :

$$\sum_{i=1}^n xi = 1 + 2 + 3 = 6 \dots \dots \dots (8)$$

$$\sum_{i=1}^n yi = 2 + 3 + 5 = 10 \dots \dots \dots (9)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i = 1 \cdot 2 + 2 \cdot 3 + 3 \cdot 5 = 2 + 6 + 15 = 23 \dots \dots \dots (10)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i^2 = 1^2 + 2^2 + 3^2 = 1 + 4 + 9 = 14 \dots \dots \dots (11)$$

Calcule B1 :

$$B1 = \frac{3.23 - 6.10}{3.14 - 6^2} = \frac{69 - 60}{42.36} = 1.5 \dots \dots \dots (12)$$

Calcule B0 :

$$B0 = \frac{10 - 1.6 \cdot 5}{3} = \frac{10 - 9}{3} = 0.333 \dots \dots \dots (13)$$

La droite de régression ajustée est donc

$$y = 0.333 + 1.5x$$

- **Code python**

```
import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

# Exemple de données

x = np.array([1, 2, 3, 4, 5])

y = np.array([2, 4, 5, 4, 5])

# Calcul des coefficients

n = len(x)

m = (n * np.sum(x*y) - np.sum(x) * np.sum(y)) / (n * np.sum(x**2) - np.sum(x)**2)

b = (np.sum(y) - m * np.sum(x)) / n

# Affichage des résultats

print(f'y = {m:.2f}x + {b:.2f}')

# Tracé du graphique
```

```
plt.scatter(x, y, color='blue', label='Données')
plt.plot(x, m*x + b, color='red', label='Régression linéaire')
plt.xlabel('x')
plt.ylabel('y')
plt.legend()
plt.show()
```

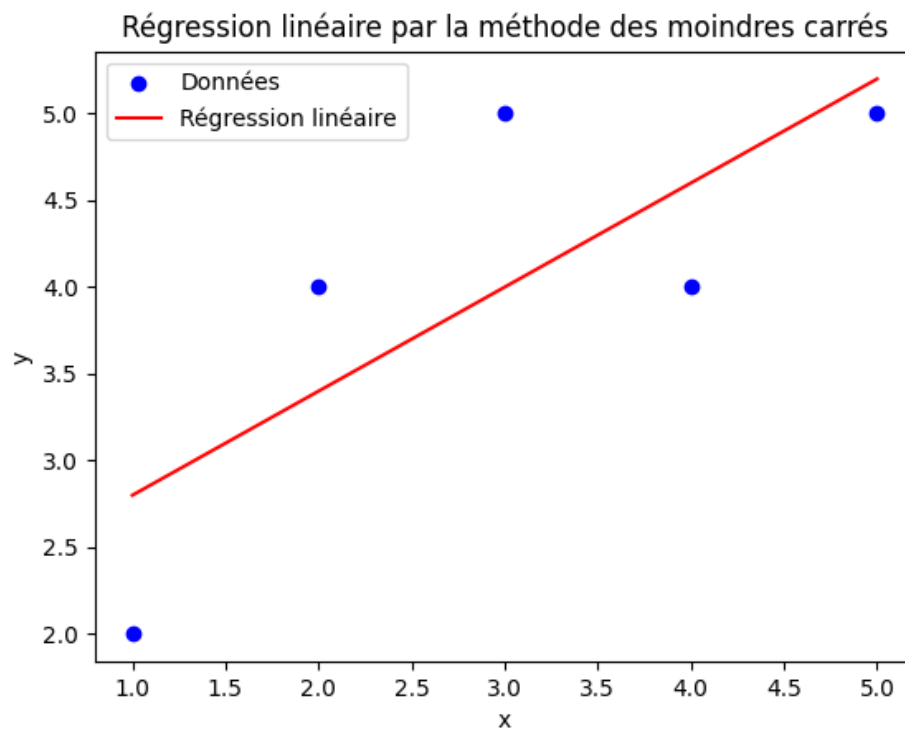


Figure III.5 Régression linéaire par méthode des moindres carrés

III.3.1.2. Ajustement d'une Cercle en 2D

Le model du cercle

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2 \dots\dots\dots(14)$$

Transformation de modèle pour linéariser les équations

$$F(a, b, R) = \sum_{i=1}^n [(xi - a)^2 + (yi - b)^2 - R^2]^2 \dots\dots\dots (15)$$

On Minimiser la somme des carrés des résidus pour trouver les valeurs optimales de a , b et R .

- **Code python**

```
import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

from scipy.optimize import least_squares

# Exemple de données : points proches d'un cercle de centre (2, -1) et de rayon 3
x = np.array([2, 3, 5, 6, 7])
y = np.array([-1, 0, 1, 0, -1])

def residuals(params, x, y):

    """Calcul des résidus pour les moindres carrés."""

    a, b, R = params

    return np.sqrt((x - a)**2 + (y - b)**2) - R

# Estimations initiales des paramètres : centre (a, b) et rayon R
initial_params = [0, 0, 1]

# Ajustement par la méthode des moindres carrés
result = least_squares(residuals, initial_params, args=(x, y))

a, b, R = result.x

print(f"Centre du cercle : ({a:.2f}, {b:.2f})")

print(f"Rayon du cercle : {R:.2f}")

# Tracé des points et du cercle ajusté
theta = np.linspace(0, 2 * np.pi, 100)

circle_x = a + R * np.cos(theta)
```

```
circle_y = b + R * np.sin(theta)

plt.figure(figsize=(6, 6))

plt.scatter(x, y, color='blue', label='Données')

plt.plot(circle_x, circle_y, color='red', label='Cercle ajusté')

plt.xlabel('x')

plt.ylabel('y')

plt.axhline(0, color='black',linewidth=0.5)

plt.axvline(0, color='black',linewidth=0.5)

plt.grid(color = 'gray', linestyle = '--', linewidth = 0.5)

plt.legend()

plt.title('Ajustement d'un cercle par la méthode des moindres carrés')

plt.gca().set_aspect('equal', adjustable='box')

plt.show()
```

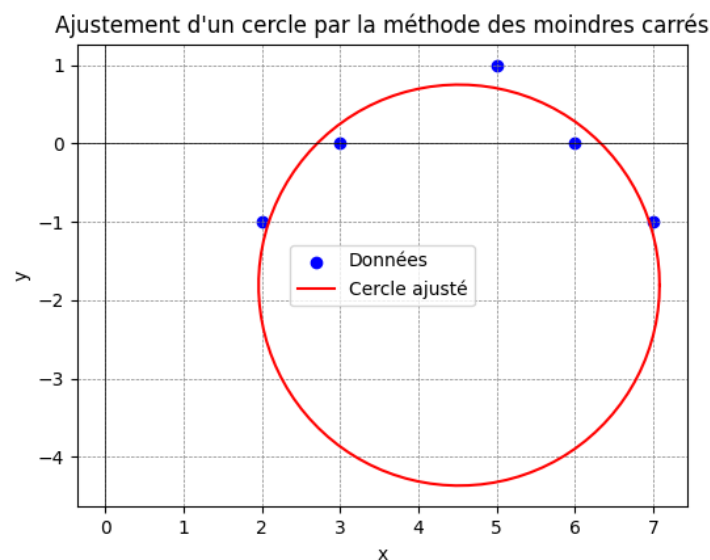


Figure III.6 Ajustement d'un cercle par la méthode des moindres des carrés

III.3.1.3. Ajustement d'une courbe non linéaire en 2d

Par exemple, un polynôme de degré n

la formule de model donner par :

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \dots\dots\dots(16)$$

Définir la fonction de résidus :

La différence entre les valeurs observées et les valeurs prédites par le modèle.

- **Application sur python**

```
import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

from scipy.optimize import curve_fit

# Exemple de données : points dispersés

x = np.array([0, 1, 2, 3, 4, 5])

y = np.array([2, 3, 5, 4, 2, 1])

# Définition du modèle polynômial de degré 3

def poly3(x, a0, a1, a2, a3):

    return a0 + a1*x + a2*x**2 + a3*x**3

# Ajustement par la méthode des moindres carrés

params, _ = curve_fit(poly3, x, y)

a0, a1, a2, a3 = params

print(f"Paramètres ajustés : a0 = {a0:.2f}, a1 = {a1:.2f}, a2 = {a2:.2f}, a3 = {a3:.2f}")

# Tracé des points et de la courbe ajustée

x_fit = np.linspace(min(x), max(x), 100)

y_fit = poly3(x_fit, a0, a1, a2, a3)

plt.scatter(x, y, color='blue', label='Données')
```

```

plt.plot(x_fit, y_fit, color='red', label='Courbe ajustée')

plt.xlabel('x')

plt.ylabel('y')

plt.legend()

plt.title('Ajustement d'un polynôme de degré 3 par la méthode des moindres carrés')

plt.grid(True)

plt.show()

```

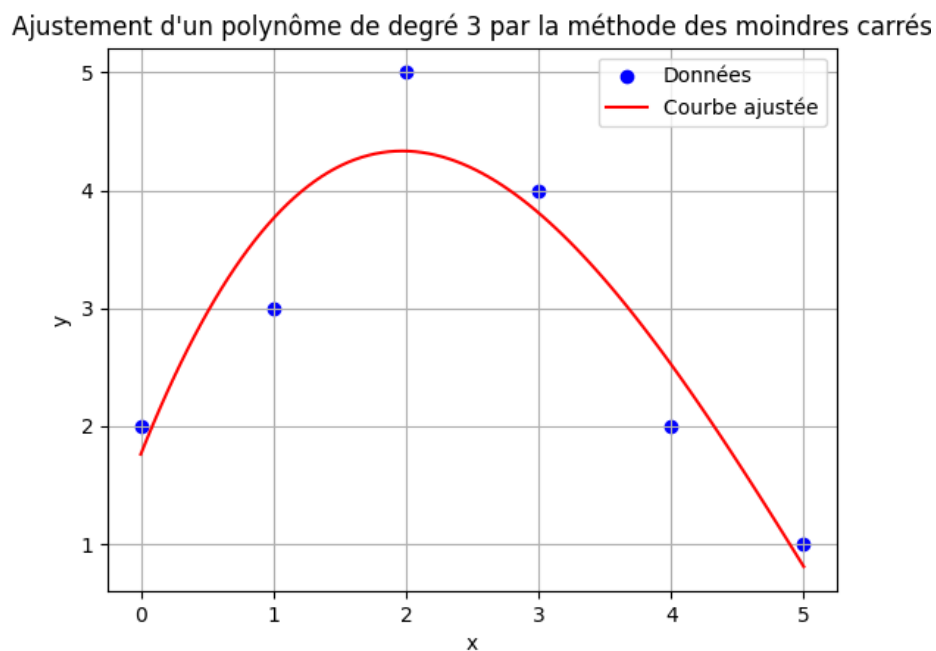


Figure III.7 Ajustement d'un polynôme par moindres carrés

III.3.2. Exemple de méthodes moindre carré 3D

III.3.2.1. Ajustement d'une surface quadratique 3D

Pour ajuster une surface non plane (une surface gauche) à un ensemble de points tridimensionnels (3D), nous devons choisir un modèle de surface approprié. Un modèle couramment utilisé est la surface quadratique, qui peut être représentée par une équation de la forme :

$$z = a + bx + cy + dxy + ex^2 + fy^2 \dots\dots\dots(17)$$

La méthode des moindres carrés peut être utilisée pour trouver les paramètres (a,b,c,d,e,f) qui minimisent la somme des carrés des écarts entre les valeurs observées z_i et les valeurs prédites par le modèle.

- **Code en Python**

```
import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

from scipy.optimize import least_squares

# Exemple de données : points 3D dispersés

x = np.array([0, 1, 2, 3, 4, 5])

y = np.array([0, 1, 2, 3, 4, 5])

z = np.array([0, 1, 4, 9, 16, 25]) # Exemple de points correspondant à  $z = x^2$ 

# Crée une grille de données x, y

X, Y = np.meshgrid(x, y)

Z = np.array([0, 1, 4, 9, 16, 25])

# Définition du modèle de surface quadratique

def quad_surface(params, x, y, z):

    a, b, c, d, e, f = params

    return a + b*x + c*y + d*x*y + e*x**2 + f*y**2 - z

# Estimations initiales des paramètres

initial_params = np.ones(6)

# Ajustement par la méthode des moindres carrés

result = least_squares(quad_surface, initial_params, args=(x, y, z))

a, b, c, d, e, f = result.x

print(f"Paramètres ajustés : a = {a:.2f}, b = {b:.2f}, c = {c:.2f}, d = {d:.2f}, e = {e:.2f}, f = {f:.2f}")

# Génération des valeurs de z ajustées
```

$$Z_{\text{fit}} = a + b \cdot X + c \cdot Y + d \cdot X \cdot Y + e \cdot X^2 + f \cdot Y^2$$

Tracé des points originaux et de la surface ajustée

```
fig = plt.figure()
```

```
ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
```

```
ax.scatter(x, y, z, color='blue', label='Données')
```

```
ax.plot_surface(X, Y, Z_fit, color='red', alpha=0.5, label='Surface ajustée')
```

```
ax.set_xlabel('X')
```

```
ax.set_ylabel('Y')
```

```
ax.set_zlabel('Z')
```

```
plt.title('Ajustement d\'une surface quadratique par la méthode des moindres carrés')
```

```
plt.legend()
```

```
plt.show()
```

Ajustement d'une surface quadratique par la méthode des moindres carrés

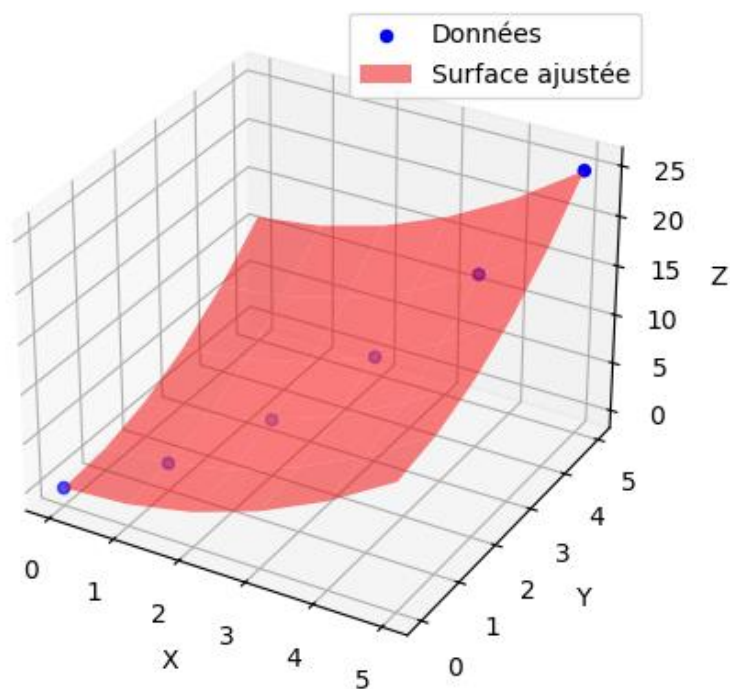


Figure III.8 Ajustement d'une surface quadratique par méthodes des moindres des carrés.

III.4. Apport d'outil de CAO pour la modélisation de l'aube de turbine à gaz

On a l'ensemble de données :

Table III-2. Caractéristique de fichier

Fichier	C:\Users\INH\Desktop\model_master.stl
Format	STL
Nombre total de points	34247
Extrémité minimale du nuage	-210,807 mm -364,401 mm -2,38495 mm
Extrémité maximale du nuage	210,971 mm 364,534 mm 585,295 mm
Rayon du nuage	513,471 mm
Centre du nuage	0,0820923 0,0663757 291,455
Dimension du nuage	421,778 mm x 728,936 mm x 587,68 mm (180681 m3)
Fichier MAILLAGE importé :	
Facteur d'échelle	10
Unité du fichier	Millimètre
Echantillonnage	100%
Données binaires provenant de	1
Facettes	Créées

Bords libres	Non
Nombre de facettes	68477
Nombre de points	34247
Import Times	CPU=0,046s. elapse=0,047s.

- Étape 1 : Génération du maillage à partir du nuage de points.

Pour générer un maillage à partir du nuage de points, utilisez l'outil (Création de) pour créer une surface maillée. Ensuite, l'optimisation de maillage en utilisant les outils de (Mesh Cleaner) pour le nettoyer et le rendre homogène. Assurez-vous que le maillage est uniforme et exempt de trous.

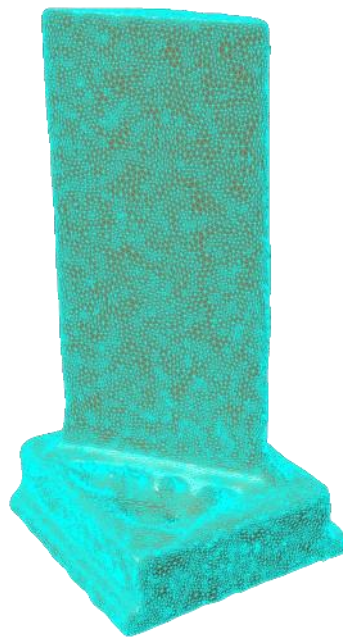


Figure III.9 Maillage et nuage de point de l'aube de turbine à gaz

- Etape 2 : création des sections plans

A l'aide des outils de création de géométrie on peut créer une référence au centre de notre pièce. Cela peut être un point, une ligne ou un plan, en fonction de ce qui est le plus approprié pour notre modèle.

Dans notre cas la référence la plus appropriée c'est une ligne verticale qui passe par le centre du plan carré.

Pour définir les plans de sectionnement, En utilisant l'outil de sectionnement pour définir les plans sur lesquels nous souhaitons créer des sections. Nous pouvons définir ces plans en spécifiant des points ou des coordonnées, ou en les faisant passer par des points spécifiques sur l'aube de turbine.

Créer les sections planes Une fois les plans définis, l'outil de sectionnement vous permettra de créer des sections planes le long de ces plans. Ces sections planes vous donneront des coupes transversales de l'aube de turbine à différents endroits, ce qui peut être utile pour l'analyse et la visualisation.

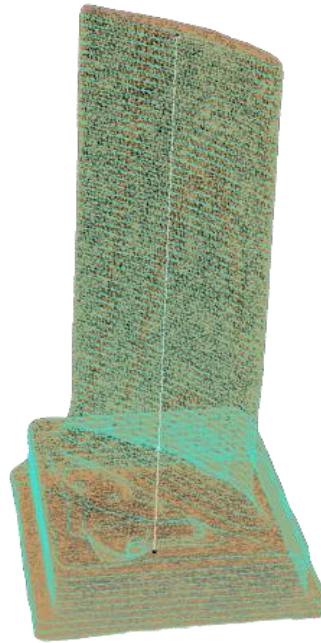


Figure III.10 Sections planes sur l'aube de turbine

Après, on va enlever notre nuage de point et le maillage pour faciliter la prochaine étape.

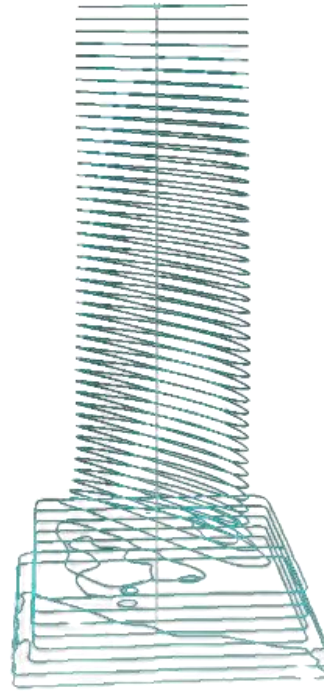


Figure III.11 Sections planes sur aube de turbine sans nuage de point et maillage

- Etape 3 : Dessiner des courbes sur chaque plan du travail.

Utilisez les outils de dessin comme SPLINE, ou Cercle pour tracer les courbes souhaitées sur chaque plan. On répéter ce processus pour chaque plan de notre modèle.

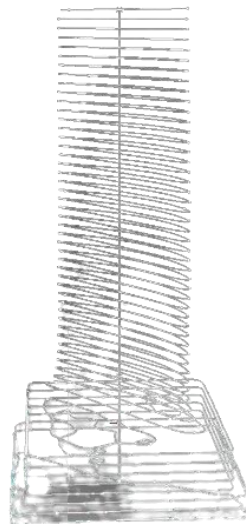


Figure III.12 Courbes de scan sur l'aube de turbine sans nuage

- Etape 4 : création d'un contour surfacique.

Pour créer des contours surfaciques, nous sélectionnons d'abord les courbes qui définissent le contour souhaité. Nous nous assurons que les courbes forment un contour fermé et continu. Ensuite, nous utilisons un outil de remplissage de surface pour générer une surface à

l'intérieur de ce contour. Nous vérifions la surface créée pour nous assurer qu'elle est conforme à nos spécifications et nous l'ajustons si nécessaire pour obtenir une surface lisse et précise. Enfin, nous enregistrons le modèle avec le contour surfacique complété.



Figure III.13 Contour surfacique de modèle avec une courbe de scan

III.5. Visualisation d'écart déviation entre le modèle et l'aube scannée

Pour visualiser l'écart de déviation entre le modèle et l'aube scannée, nous allons ajuster le modèle surfacique avec le nuage de points. Cette étape consiste à superposer le modèle surfacique sur le nuage de points obtenu à partir de la numérisation de l'aube, afin d'identifier et de visualiser les différences entre les deux. Nous utiliserons des outils de comparaison pour mesurer les écarts de déviation, ce qui nous permettra de vérifier la précision du modèle par rapport à la pièce réelle scannée. En ajustant le modèle surfacique en fonction de ces écarts :



Figure III.14 Modèle surfacique avec le nuage de point d'aube de turbine

- Analyse de déviation entre le modèle et le nuage de point :

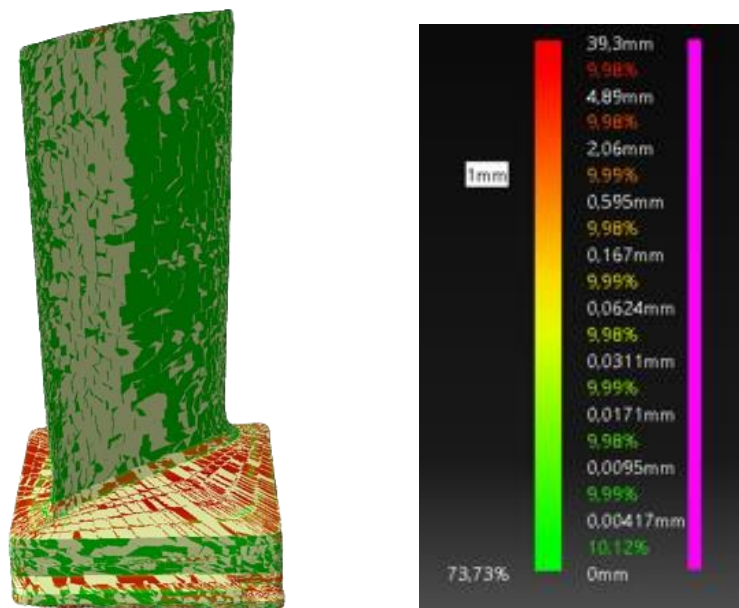


Figure III.15 Analyse des déviations

Dans le cadre de la conception assistée par ordinateur (CAO), il est essentiel d'examiner les déviations entre les valeurs théoriques et les mesures réelles pour évaluer la précision du modèle. On a constaté des déviations allant jusqu'à 39 mm, principalement dues à la qualité insuffisante du scanner utilisé et à l'absence de normes disponibles pour les pièces analysées. Ces facteurs ont considérablement affecté la précision de notre modèle. Malgré ces déviations importantes, il est crucial d'améliorer la qualité des équipements de numérisation et de définir des normes claires pour les pièces afin de réduire ces écarts et d'optimiser la fiabilité et la

précision de notre modèle CAO.

Les déviations observées, principalement comprises entre 0.004 mm et 0.5 mm, indiquent que notre modèle est généralement fidèle aux spécifications attendues. Des déviations de 0.004 témoignent d'une précision quasi parfaite, tandis que celles allant jusqu'à 0.5, restent acceptables dans de nombreux contextes industriels où des tolérances plus larges sont permises. Par conséquent, notre modèle CAO est fiable et conforme aux normes de qualité requises, tout en offrant des possibilités d'optimisation continue.



Figure III.16 Modèle en plein avec affichage rendu réaliste

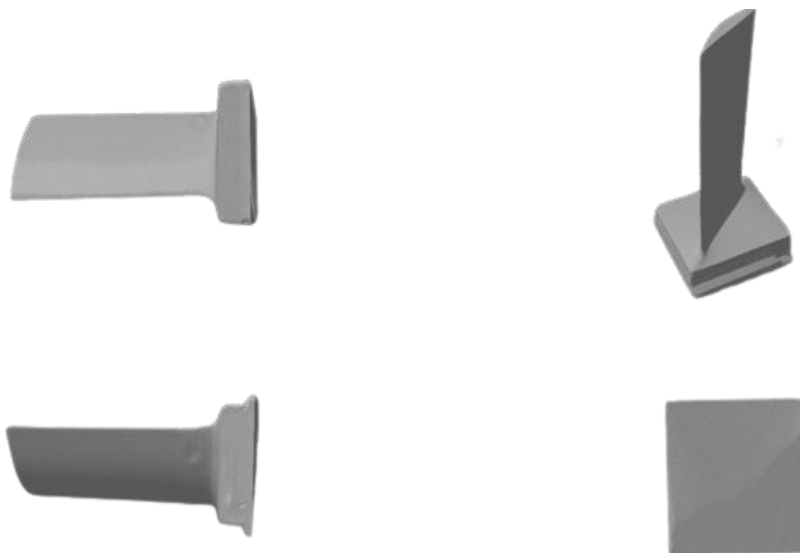


Figure III.17 Modèle final coloré en acier avec affichage rendu réaliste

III.6. Conclusion

La modélisation d'une aube par conception assistée par ordinateur (CAO) a exploré les différentes étapes et méthodes impliquées dans la création d'un modèle STL précis à partir d'un nuage de points. Nous avons commencé par l'acquisition des données initiales sous forme de nuage de points, suivie par l'application des méthodes de moindres carrés pour minimiser les erreurs et améliorer la précision du modèle. Ensuite, nous avons généré le contour surfacique du modèle, en veillant à ce que les détails et les caractéristiques géométriques soient fidèlement représentés. L'analyse des déviations entre le modèle et le nuage de points a révélé des écarts, dont certains importants, dus principalement à des limitations techniques et à l'absence de normes spécifiques pour les pièces analysées. Cependant, en validant le modèle à travers diverses techniques et en comparant les résultats avec les tolérances acceptables, nous avons démontré que, malgré certaines déviations, le modèle est globalement fiable. Ce processus souligne l'importance d'améliorer continuellement la qualité des équipements de numérisation et de définir des normes claires pour garantir des modèles CAO de haute précision.

Chapitre IV

Mise en œuvre l'impression en 3D en utilisant la méthode de reverse engineering

IV.1.Introduction

L'impression 3D, également appelée fabrication additive, représente l'une des innovations technologiques les plus marquantes du XXI^e siècle. Depuis sa conception initiale dans les années 1980, cette technologie a évolué rapidement, transformant non seulement les processus de fabrication traditionnels, mais aussi les possibilités de conception et de développement de produits dans une variété de secteurs. Aujourd'hui, l'impression 3D est utilisée pour créer des objets complexes et personnalisés avec une précision et une efficacité inégalées, ouvrant la voie à des applications révolutionnaires dans des domaines aussi divers que l'industrie.

La technologie de l'impression 3D consiste à réaliser des objets en trois dimensions en superposant des couches de matériau successives, habituellement à partir d'un modèle numérique. Au lieu de fabriquer un objet en sculptant ou en moulant un bloc de matériau, comme c'est le cas dans les méthodes traditionnelles de fabrication, l'impression 3D construit l'objet couche par couche, offrant ainsi une grande liberté de conception et une personnalisation facile.

L'impression 3D offre une flexibilité et une liberté de conception sans précédent, permettant la création d'objets de formes complexes qui seraient difficiles, voire impossibles à réaliser avec des méthodes de fabrication traditionnelles. De plus, elle offre la possibilité de produire des pièces personnalisées.

Cette technologie trouve des applications dans une multitude de domaines, de l'industrie manufacturière à la médecine en passant par l'architecture et l'aérospatiale. Elle est utilisée pour la fabrication de prototypes, de pièces de rechange, d'outils, de prothèses, de maquettes architecturales, et bien plus encore.

En somme, l'impression 3D représente une véritable révolution dans le domaine de la fabrication, offrant des possibilités infinies pour la création d'objets innovants et sur mesure, et ouvrant la voie à de nouvelles avenues de créativité et d'innovation.

IV.2.Principe et technologie de l'impression 3D

L'impression 3D regroupe les technologies permettant de fabriquer des pièces par couches successives de matière à partir d'un modèle numérique. Passer par les étapes suivantes.

Conception du modèle : Tout commence par un modèle numérique de l'objet que vous souhaitez créer. Ce modèle est conçu soit à partir de zéro dans un logiciel de CAO (conception assistée par ordinateur), soit à partir d'un scan 3D d'un objet existant.

Préparation du fichier : Une fois l'objet créé numériquement, Cela implique souvent de découper le modèle en couches minces, généralement de quelques micromètres d'épaisseur, pour que l'imprimante puisse les fabriquer une par une.

- **Choix du matériau**

Il existe de nombreux types de matériaux utilisés en impression 3D, notamment le plastique, la résine, le métal, la céramique, etc. Chaque matériau a ses propres propriétés et avantages, et le choix dépendra de l'application et des exigences de l'objet à imprimer.

- **Impression**

L'imprimante 3D commence à fabriquer l'objet couche par couche, en suivant les instructions du modèle numérique. Chaque couche est solidifiée ou fusionnée selon le matériau utilisé. Ce processus se répète jusqu'à ce que l'objet soit entièrement construit.

- **Post-traitement**

Une fois l'impression terminée, l'objet peut nécessiter un post-traitement, comme le retrait de supports de matériau utilisés pour stabiliser les parties surplombantes pendant l'impression, ou des étapes de finition telles que le ponçage ou la peinture.

- **Inspection et test**

Une fois que l'objet est prêt, il est important de l'inspecter pour s'assurer qu'il répond aux normes de qualité et aux spécifications requises. Dans certains cas, des tests supplémentaires peuvent être nécessaires pour vérifier la résistance, les dimensions, ou d'autres propriétés spécifiques.

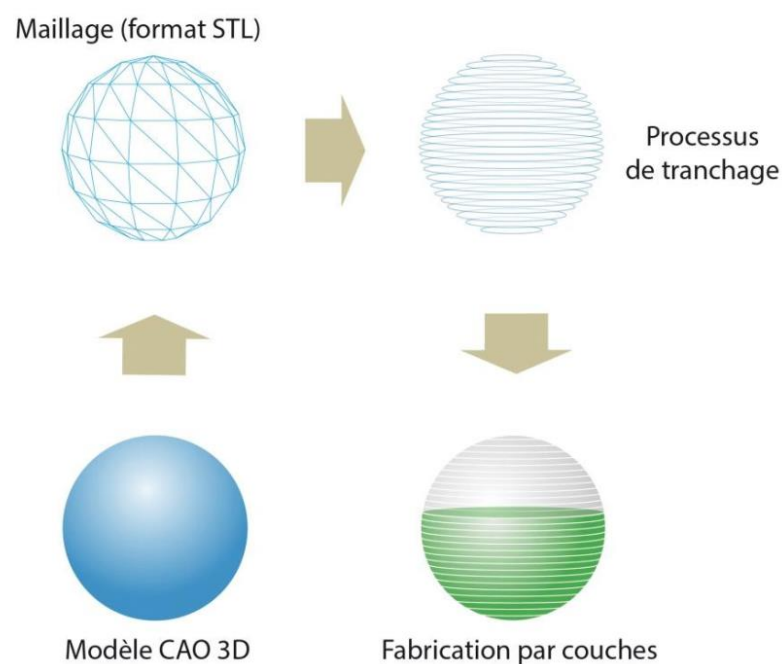


Figure IV.1 Principe général de l'impression 3D

IV.3.Type d'impression en 3D

Sur le marché actuel, diverses technologies d'impression 3D sont déjà disponibles, tandis que d'autres sont encore en phase de développement. Chacune de ces technologies exige l'utilisation d'un type spécifique de matériau d'impression 3D, variant du filament plastique à la résine liquide photosensible, voire à la poudre (métallique, plastique, etc.). Chaque technologie d'impression 3D possède ses propres avantages et est adaptée à des applications spécifiques.

IV.3.1. Dépôt de filament fondu (FFF)(FDM)

La méthode d'impression 3D par dépôt de fil fondu, également connue sous le nom d'extrusion, utilise du filament plastique (généralement du PLA ou de l'ABS) comme matériau de consommation. C'est la méthode d'impression 3D la plus courante.

On chauffe et fond le filament dans la tête d'impression (également connue sous le nom d'extrudeur) de l'imprimante 3D, puis il sort à travers une fine buse. Le déplacement horizontal de l'extrudeur se fait en parallèle avec le déplacement vertical de la plateforme d'impression sur un axe vertical Z, à l'exception d'une imprimante 3D delta où le lit d'impression est fixé.

Le filament fondu est déposé par couches successives sur l'imprimante 3D afin de créer l'objet en 3D. Une fois que la couche est terminée, le plateau d'impression descend légèrement vers l'axe.

L'épaisseur minimale de la couche fournie par l'imprimante 3D joue un rôle essentiel dans la précision et la qualité du résultat final (plus les couches sont fines, plus la résolution est élevée et le résultat est précis).

IV.3.1.1. Composants d'une imprimante 3D FDM

Toutes les imprimantes 3D FFF sont assez similaires en termes de construction. Elles se composent généralement des pièces suivantes :

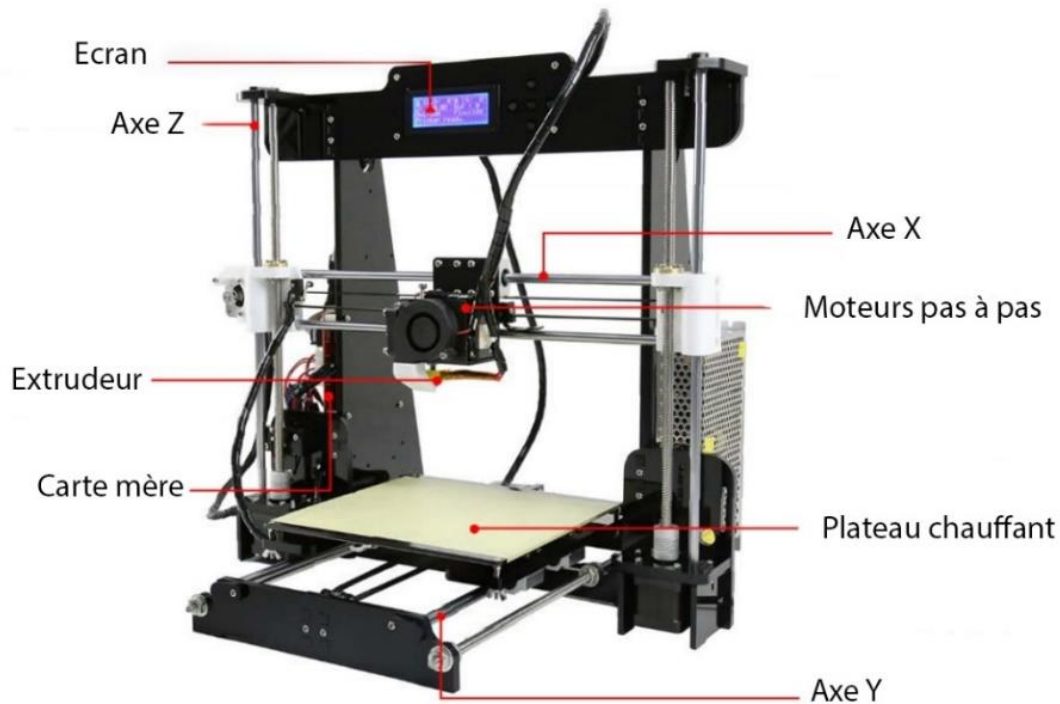


Figure IV.2 Composantes de l'imprimante 3D

- **Extrudeur**

Aussi appelé tête d'impression, est conçu pour déposer des couches imprimées en extrudant du plastique fondu. Voici un résumé reformulé du processus :

Le filament entre dans l'extrudeur par un tube en PTFE alors qu'il est encore solide à température ambiante. Pour éviter les problèmes de transition entre le filament solide et fondu, un dissipateur thermique est utilisé pour dissiper la chaleur de la barrière thermique. Ce dissipateur thermique est souvent équipé d'un ventilateur pour un refroidissement optimal. La barrière thermique, un tube avec un diamètre réduit à une extrémité, limite le transfert de chaleur vers la zone où le filament doit rester solide.

Le bloc de chauffe, généralement en aluminium, contient un élément chauffant électrique et une thermistance pour contrôler la température. C'est là que le matériau est fondu avant d'être poussé à travers la buse. La buse peut avoir différents diamètres, et certains modèles d'imprimantes permettent aux utilisateurs de la remplacer par une autre avec un diamètre différent selon leurs besoins.

- **Plateau chauffant**

Le plateau chauffant constitue une composante essentielle de toute imprimante 3D contemporaine, visant à garantir la compatibilité avec une variété de matériaux. Son rôle principal est d'empêcher les objets imprimés de se plier, se déformer ou se détacher de la

surface d'impression.

- **Cadre**

Il représente la structure de soutien de l'imprimante. Des cadres rigides et précisément construits influent positivement sur la qualité des impressions. Une structure solide et bien établie réduit les vibrations, favorisant ainsi des impressions plus rapides et de meilleure qualité, avec moins de défauts perceptibles.

- **Moteurs pas à pas**

Les moteurs pas à pas sont responsables des mouvements sur tous les axes, y compris ceux de l'extrudeur et du plateau chauffant, ainsi que du mouvement du filament pour certains modèles. L'avantage principal de ces moteurs réside dans leur capacité à contrôler précisément les pas, assurant ainsi une précision optimale dans les déplacements.

- **Carte mère**

La carte mère est un élément essentiel dans une imprimante, étant un composant électronique comportant des circuits intégrés. Son rôle central est de superviser l'intégralité du fonctionnement de l'appareil. Elle se charge notamment de décoder les fichiers d'instructions, généralement au format G-Code, et de coordonner les actions des divers composants, tels que les moteurs, le plateau chauffant et le bloc de chauffe, en accord avec ces instructions.

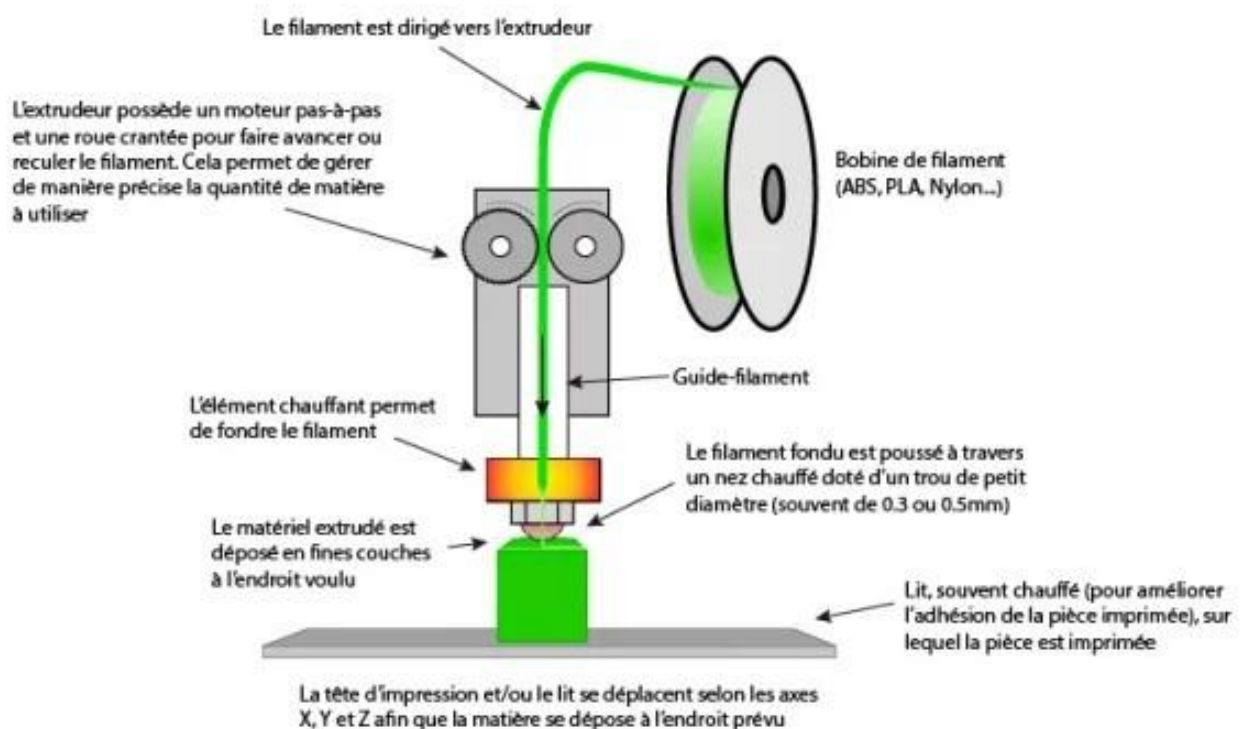


Figure IV.3 Principe de fonctionnement d'une imprimante 3D FFF

IV.3.2. Photo polymérisation

Un laser ou une source de lumière solidifie une résine liquide et photosensible, point par point (SLA laser) ou couche par couche (DLP).

IV.3.2.1. Stéréo lithographie

C'est le premier système d'impression 3D, créé en 1986 et développé par 3D System. Aucune buse ni fil de plastique n'est utilisé ici, mais plutôt un laser ultra-violet et un bac contenant du photopolymère liquide. À l'instar du système à dépôt de filament, cette méthode imprime à l'aide de couches. Le laser touche le liquide qui se fige sous l'action des rayons UV. Le matériau ainsi solidifié est soutenu par un plateau immergé dans le bac, qui descend, comme pour la FDM, pour passer d'une couche à la suivante.

Après l'impression, il est nécessaire de rincer l'objet afin de retirer les résidus de photopolymère avec un solvant. Par la suite, l'objet a été placé au four afin de le solidifier.

Les matériaux utilisables restent assez peu nombreux et malgré la précision exceptionnelle de la SLA, cette méthode permet de livrer des objets plutôt fragiles. Elle se contente donc de prototypage et non de fabrication d'objets.

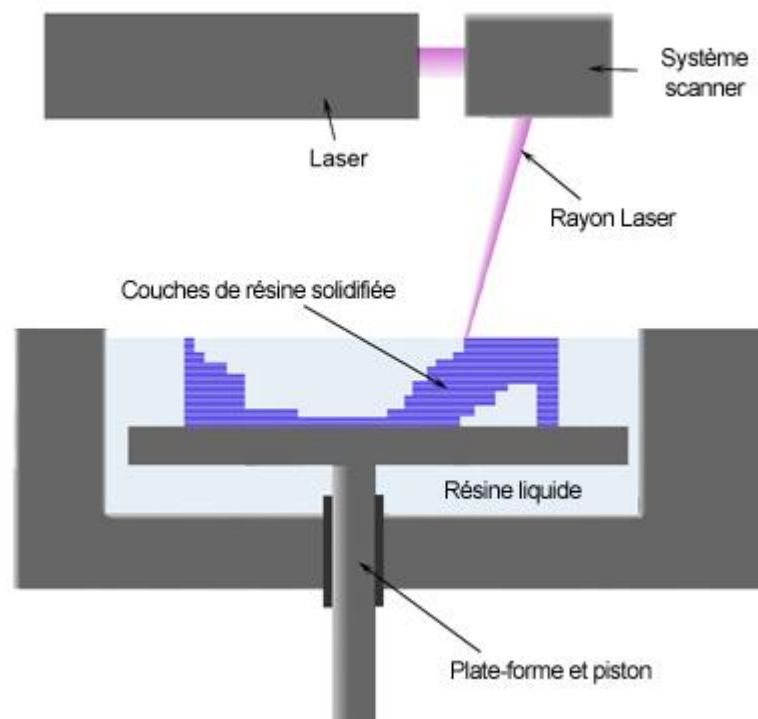


Figure IV.4 Principe de fonctionnement d'une imprimante 3D SLA

IV.3.2.2. Procédé DLP

Créé pour des tâches exigeant une précision élevée, telles que la bijouterie ou la production de prothèses, le procédé DLP repose sur la même technologie que celle qui est intégrée dans de nombreux vidéoprojecteurs. Le principe ressemble à celui de la SLA, car la lumière est employée pour rendre un polymère liquide solide. La puce, qui est constituée d'une matrice de miroirs orientables, parfois de plusieurs millions, réfléchit une lumière UV et émet une image qui correspond à la forme de la couche à imprimer. Ainsi, cette lumière agit sur le polymère qui se trouve dans un récipient afin de le solidifier. Le processus de traitement se déroule en couche, tout comme dans le cas du SLA.

Le principal avantage du procédé DLP par rapport à la stéréo lithographie réside dans sa rapidité. Effectivement, une couche peut se solidifier à chaque fois qu'une lumière est projetée. Il ne faut qu'un déplacement vertical de la plateforme.

IV.3.3. Fusion de poudre

Un laser fusionne des particules de poudre point par point.

IV.3.3.1. Frittage laser

Comme la SLA, le processus SLS fait appel à un laser. Par contre, la distinction réside dans le matériau, qui n'est plus liquide, mais plutôt sous forme de poudre de plastique, de céramique, de verre ou de métal. Un bac contenant le matériau (la poudre) est également présent ici, mais c'est un rouleau qui dépose une fine couche (0,1 mm) sur la plateforme d'impression. La première couche est solidifiée par le laser, puis l'opération se répète pour chaque couche. Après avoir terminé le processus, l'objet est retiré et débarrassé des restes de poudre non fusionnée.

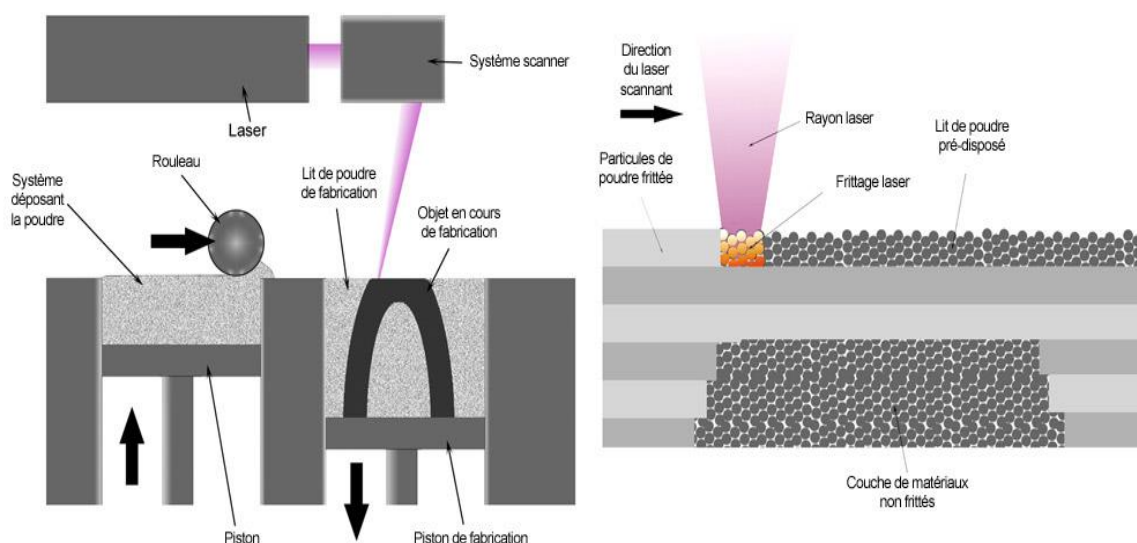


Figure IV.5 Principe de fonctionnement d'une imprimante 3D SLS

Cette technologie présente l'avantage d'être très écologique et de pouvoir réutiliser la poudre non fusionnée par la suite. D'un autre côté, le SLS nécessite une poudre avec des grains uniformes et un réglage laser extrêmement précis.

IV.3.3.2. Fusion laser SLM

Les imprimantes 3D SLM (Selective Laser Melting) fonctionnent grâce à la fusion laser, un procédé similaire à la technologie de frittage sélectif de poudre. Toutefois, contrairement au frittage, la fusion laser implique la fusion réelle des particules de poudre par le laser, plutôt que leur simple frittage. Ce processus permet de former des objets solides en fusionnant les particules de poudre. Les imprimantes 3D SLM sont largement utilisées dans des applications industrielles telles que l'aérospatiale et le secteur médical, où elles sont employées pour imprimer des pièces métalliques, comme des couronnes dentaires, par exemple.

IV.4. Matériaux utilisés de l'impression 3D

Il est courant de penser que le plastique est le matériau principal en impression 3D, mais en réalité, une variété de matériaux est disponible pour cette technologie. Chaque méthode d'impression 3D est associée à des matériaux spécifiques : les imprimantes FDM utilisent des filaments plastiques, les machines SLA utilisent des résines liquides, et les systèmes à laser utilisent des poudres polymères ou métalliques. Dans l'impression 3D, on distingue principalement deux grandes catégories de matériaux : les plastiques et les métaux, auxquels s'ajoutent les céramiques (comme la silice ou l'alumine) et d'autres matières organiques (comme les cires, les tissus et les cellules). Explorons les caractéristiques et les applications des principaux matériaux utilisés dans la fabrication additive.

IV.4.1. Matériaux plastiques

Parmi les thermoplastiques les plus employés en FDM (dépôt de matière fondue), on retrouve 2 consommables dominants : le PLA et l'ABS, des polymères qui deviennent mous et malléables lorsqu'ils sont chauffés et qui reviennent à un état solide au moment de refroidir. La maîtrise des températures du filament et de la table d'impression est cruciale pour obtenir des résultats optimaux en impression 3D. Le filament, généralement constitué de matériaux thermoplastiques comme le PLA, l'ABS ou le PETG, doit être chauffé à une température spécifique pour assurer une extrusion fluide et une bonne adhésion entre les couches.

- **PLA**

C'est le matériau de consommation le plus souvent utilisé pour l'impression 3D FDM. Grâce à sa composition végétale (amidon de maïs, racine de manioc et betterave), il est respectueux de l'environnement et biodégradable, avec une légère odeur sucrée lors de l'impression. Il peut être utilisé en toute sécurité pour fabriquer des objets destinés au contact alimentaire, tels que des bols ou des tasses, lorsqu'il est pur et utilisé avec un extrudeur en acier inoxydable.

Une bobine de 1 kg de filament PLA de 1,75 mm offre en moyenne 330 mètres de filament,

et 115 mètres pour un diamètre de 3 mm. Les paramètres d'impression recommandés pour le PLA se situent généralement entre 190 et 210 °C, avec un plateau chauffant en option. Sa densité est d'environ 1,25 g/cm³.

Son principal avantage est qu'il ne dégage pas d'odeur désagréable lors de l'impression et qu'il est pratique à utiliser. Il présente des inconvénients tels que sa réactivité à l'humidité et à la chaleur, ce qui peut causer des conséquences de déformation dans des environnements chauds ou humides.

- **ABS**

Conçu à partir de pétrole, c'est le matériau le plus versatile car il est compatible avec pratiquement toutes les imprimantes 3D, les pièces métalliques peuvent être soudées avec une goutte ou deux d'ABS soluble dans l'acétone, ou elles peuvent être lissées et brillantes en brossant ou en trempant les pièces entières dans l'acétone. Il est le matériau privilégié des ingénieurs et des applications professionnelles en raison de sa force, de sa souplesse et de sa résistance à la température exceptionnelle.

Une bobine de 1kg d'ABS de 1,75 mm mesure en moyenne 410 mètres et 140 mètres en 3 mm.

Température d'impression : entre 220 et 260 °C / Plateau chauffant entre 60 et 110°C

Densité : 1,01g/cm³

Points forts : Matériau polyvalent et particulièrement résistant, supporte bien les écarts de température.

Points faibles : Odeurs pendant l'impression et parfois sujet au phénomène dit de warning (décollement des bords de la pièce et déformation).

- **PVA et HIPS : les matériaux de support**

Il sera nécessaire de prévoir ce que l'on nomme un raft (ou ratier) pour une impression 3D de type FDM (dépôt de matière fondue). Il s'agit d'un support qui assure la stabilité de la pièce sur le plateau pendant l'impression. Il se présente sous la forme d'une grille qui favorise une accroche plus efficace. Il y a également des supports (voir photo ci-dessous), des échafaudages qui permettent de soutenir les éléments en surplomb,

Le PVA et l'HIPS (high-impact polystyrène) sont les matériaux les plus couramment employés, car ils peuvent tous deux se dissoudre dans de l'eau ou avec du D-Limonène (un solvant) en 24 heures. Il est utilisé avec de l'ABS qui présente les mêmes températures d'extrusion et de plateau, ce qui signifie que ce matériau ne peut être utilisé que pour les imprimantes 3D à double extruder.

Température d'impression du PVA : entre 190 et 210 °C / plateau chauffant optionnel

Points forts : facile à imprimer et inodore

Points faible : sensible à l'humidité

Température d'impression de l'HIPS : entre 220 et 260 °C / plateau chauffant entre 60 et 110 °C.

Points forts : Bonne finition et généralement moins cher que le PVA

IV.4.2. Poudre de polyamide

On recourt principalement à ce matériau pour réaliser des prototypes en plastique blanc, en utilisant une technique d'impression 3D par frittage laser. En utilisant un faisceau laser, cette méthode permet de sculpter votre objet en fusionnant les grains qui se solidifient sous l'action de la chaleur.

Grâce au polissage, la pièce est terminée. Cette poudre présente un niveau de précision élevé et confère aux impressions une apparence sableuse, granuleuse et légèrement poreuse. Ainsi, il est souvent indispensable de procéder à un polissage. Ensuite, il est possible de teindre les pièces en les plongeant dans un bain de teinture approprié. Celle-ci est principalement employée dans la production de mécanismes et d'engrenages, mais elle peut également être utilisée pour des objets alimentaires.

IV.4.3. Poudre d'alumide

Le polyamide est un mélange d'aluminium et de polyamide. Ce matériau présente l'intérêt de pouvoir fabriquer des pièces à la fois extrêmement solides et extrêmement souples, d'une grande résistance à la chaleur. Elle présente une apparence similaire au métal et est imprimée par frittage laser avec des particules d'alumine de 60 µm (micromètres). Ensuite, les objets imprimés requièrent différentes finitions comme le polissage ou le meulage.

IV.4.4. Résine liquide

Plusieurs méthodes d'impression 3D par « stéréo lithographie », font appel à des résines liquides qui sont photosensibles. Les imprimantes 3D sont des machines utilisant une source de lumière comme un laser, un projecteur ou une lumière UV pour convertir différents matériaux liquides en plastique solide.

Les objets imprimés par ce procédé se distinguent par leur grande précision et leur surface lisse. Même si elle propose une gamme de couleurs plus limitée que d'autres méthodes similaires, l'impression 3D en résine dépasse maintenant les couleurs de base comme le noir, le blanc, le gris et le transparent. Il existe maintenant un plus grand nombre de teintes comme le rouge, le bleu, le jaune et le vert. D'autre part, il est important de noter que les capacités offertes par les technologies industrielles basées sur des procédés à jets de matière ou de liant sont très différentes. Par exemple, la technologie Polyjet de Stratasys offre la possibilité de fusionner des millions de couleurs, en plus d'être photoréalistes.

Il existe des résines plus sophistiquées pour des domaines techniques particuliers, tels que la dentisterie (où la biocompatibilité est essentielle) ou l'ingénierie. Certaines avancées sont également visibles avec l'émergence de résines à haute viscosité qui répondent aux exigences des industriels pour des pièces plus techniques.

En ce qui concerne la finalisation, il est important de souligner que l'utilisation de résines en impression 3D requiert généralement un processus de post-traitement, où les pièces doivent être nettoyées à l'alcool isopropylique, puis durcies afin d'obtenir des résultats optimaux.

IV.4.5. Poudres métalliques

Les métaux sont les matériaux les plus utilisés en impression 3D, principalement par les entreprises industrielles. Le titane et l'acier inoxydable (inox) sont les plus couramment utilisés, suivis de l'aluminium, du cobalt, du fer et des métaux précieux tels que l'or et le platine. La technologie de fabrication additive offre la possibilité de fabriquer des pièces métalliques avec des formes plus complexes que les méthodes de fabrication soustractives comme le fraisage ou le moulage.

- **Poudre de fer pur**

La plupart du temps, les éléments métalliques sont imprimés à partir de poudres métalliques combinées avec un laser. En associant l'impression 3D à l'optimisation topologique, des pièces sont légères par rapport aux pièces classiques et même plus résistantes, grâce à des géométries optimisées et à l'absence de fixations. Cette compétence attire particulièrement l'attention des fabricants de l'industrie aéronautique et spatiale, ainsi que de l'industrie automobile, dans un souci de performance et d'économie de carburant.

- **Acier inoxydable**

L'acier inoxydable, également appelé « d'inox », a été le premier métal à être proposé en vente pour la fabrication additive. Selon son nom, il présente des caractéristiques mécaniques de grande résistance à la corrosion.

- **Titane**

L'impression de pièces en titane ou en ses alliages est connue pour sa légèreté, sa solidité et sa grande résistance à la corrosion. Les méthodes classiques utilisées pour ce matériau présentent le désavantage d'être onéreuses et moins fiables que la fabrication additive. Effectivement, lors de la soudure d'une pièce en titane, par exemple, il est courant que des impuretés s'y déplacent, ce qui la fragilise. De plus, le titane est un métal qui se refroidit rapidement, ce qui demande l'emploi d'outils très coûteux.

- **Aluminium**

On peut citer l'AlSi10Mg, un alliage qui, grâce à sa composition (magnésium et silicium), est à la fois extrêmement léger et extrêmement solide. Ce matériau est généralement employé

dans la production de moules à parois fines et aux formes complexes. L'alumide, une poudre composée de polyamide et d'aluminium, présente également l'avantage de pouvoir fabriquer des pièces à la fois solides et flexibles, avec une grande résistance à la chaleur.

IV.4.6. Céramique

Les procédés d'impression 3D utilisés pour la céramique sont le FDM (filament céramique ou pâte). Après avoir été imprimé, il est nécessaire de procéder à un traitement par émaillage séché à plus de 1 000°. Ce procédé permet de renforcer l'objet et de lui conférer une apparence lisse et éclatante. La teinte est obtenue pendant la phase d'émaillage. Outre son étanchéité et sa capacité à être recyclée, la céramique est un matériau alimentaire et biodégradable. Il convient parfaitement à la production de vaisselles (tasses, soucoupes, assiettes...), ainsi qu'à la production d'implants médicaux et de différents éléments pour l'industrie aérospatiale.

IV.5. Impression par dépôt de filament fondu

IV.5.1. Logiciel de découpe

La phase de modélisation 3D permet de créer un fichier au format STL qui peut être importé dans le logiciel de découpe, dernière étape clé avant de lancer l'impression.

Le découpage, également appelé "slicing" en anglais, est le processus par lequel un logiciel de découpage (comme Ultimaker Cura) divise un modèle 3D en couches individuelles (tranches) afin de préparer le fichier pour l'impression 3D.

Il a pour rôle premier de créer le parcours d'impression de la machine. Pour se faire, il tranche le modèle 3D en une série de fines couches et génère une description de la découpe dans un fichier de type G-Code (un langage de programmation de commande numérique) qui contient toutes les instructions d'impression qui seront lues par l'imprimante 3D. aussi permet de configurer les paramètres d'impression selon les besoins. Cela inclut des variables telles que la densité de remplissage, l'épaisseur de la couche, la vitesse d'impression, la température de la buse, etc.

IV.5.2. Paramétrage du logiciel de découpe

IV.5.2.1. Orientation de la pièce

Le premier aspect à considérer est l'orientation de la pièce sur le plateau d'impression. Cette orientation a un impact significatif sur l'état de surface et la résistance mécanique de la pièce. L'axe horizontal produit un rendu plus lisse comparé à l'axe vertical, qui révèle souvent un léger crénelage dû à l'empilement des couches. Pour obtenir une impression de haute qualité, il faut également éviter autant que possible les zones en surplomb supérieures à 45°. Au-delà de cet angle, l'utilisation de matériau de support devient indispensable.

L'orientation de la pièce, qu'elle soit verticale ou horizontale, affecte ses caractéristiques mécaniques. La liaison entre les couches étant fragile, l'axe vertical Z peut être jusqu'à 10 à 20 % moins résistant que l'axe horizontal XY, en fonction de la pièce imprimée, du matériau et des conditions d'impression.

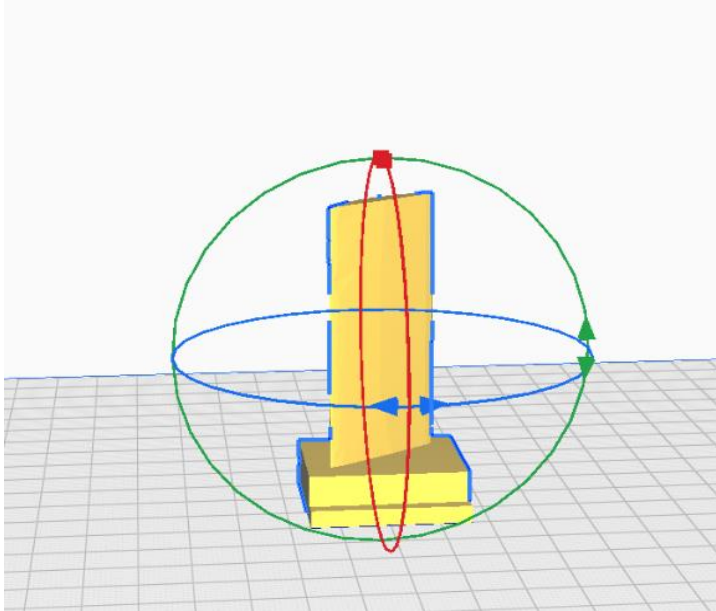


Figure IV.6 Orientation de la pièce dans le logiciel de découpe

IV.5.2.2. Choix du motif et densité remplissage

Le remplissage de la pièce a un impact crucial sur le temps d'impression et la solidité de l'objet. L'usage final de l'élément déterminera en grande partie le choix de son remplissage. Une densité remplissage très faible (10 %), avec un quadrillage intérieur très espacé utilisant peu de matière, est approprié pour des pièces non fonctionnelles. En revanche, si la pièce est destinée à un usage pratique, un remplissage d'au moins 50 % est recommandé. La densité du remplissage d'une zone de l'objet à une autre peut être modifiée par certains logiciels de découpe, ce qui permet une plus grande liberté de contrôle des propriétés de résistance et du temps d'impression.

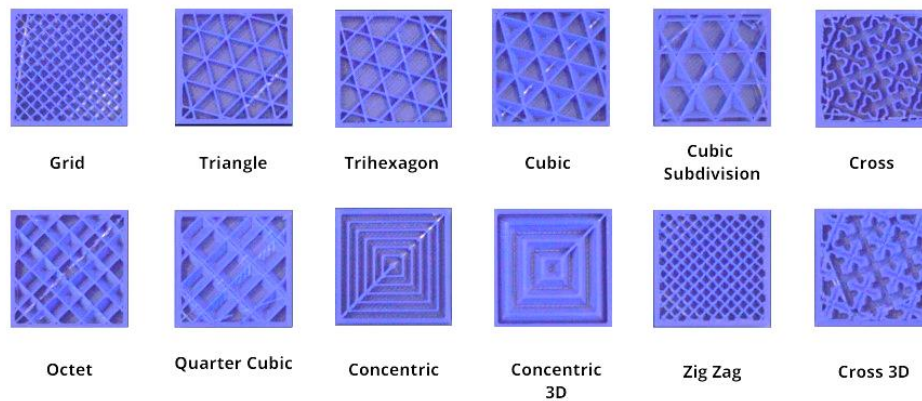


Figure IV.7 motifs de remplissage

De plus, il sera nécessaire de sélectionner le motif de remplissage en fonction de l'utilisation de la pièce. En règle générale, le remplissage rectangulaire garantit une solidité à tous les angles et s'imprime rapidement. Le remplissage en forme de triangle ou de diagonale garantit une résistance accrue des murs, mais nécessite plus de temps pour l'impression. Pour une pièce qui exige d'être équipée. Flexible, avec la capacité de se tordre ou de se compresser, le remplissage en zigzag (wiggly) est le plus approprié. Finalement, le remplissage en nid d'abeille, très prisé, offre une solidité accrue dans toutes les directions. Permet une solidité renforcée dans toutes les directions.

IV.5.2.3. L'épaisseur de couche

Chaque procédé d'impression fonctionne par l'addition successive de couches de matière. L'épaisseur de ces couches, définie par la technique, le matériau et les paramètres d'impression choisis, est un facteur déterminant. Quel que soit le processus utilisé, l'épaisseur de couche influence directement la finesse des détails. Plus l'épaisseur de couche est réduite, plus la surface de l'objet sera lisse, mais le temps d'impression sera plus long. À l'inverse, une plus grande épaisseur de couche permet une impression plus rapide, mais avec une surface plus rugueuse et souvent une précision moindre.

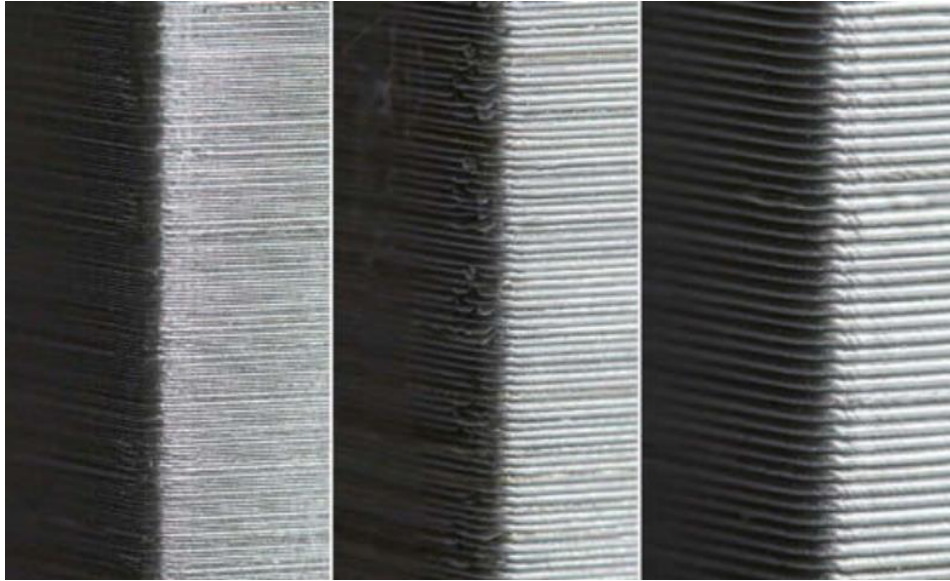


Figure IV.8 Trois épaisseurs de couche, de la plus fine (à gauche) à la plus épaisse (à droite)

IV.5.2.4. Génération de supports (si nécessaire)

Si le modèle comporte des parties surplombantes ou des structures fragiles, le logiciel peut générer automatiquement des structures de support pour les soutenir pendant l'impression. Ces supports sont ensuite retirés une fois l'impression terminée.

Pour l'impression 3D par extrusion de matière, le support peut prendre trois formes : soluble, en accordéon ou en arbre.

- **Support soluble**

Il est plus coûteux et moins rapide à imprimer mais il n'abîme pas la surface finale de l'objet

- **Support en accordéon**

Il est le plus couramment utilisé mais il nécessite plus de filament et peut affecter l'état de surface final de l'objet.

- **Support en arbre**

Il offre moins de stabilité mais il permet un rendu final plus lisse car il touche moins de surface.

IV.5.2.5. Optimisation de position de la pièce à imprimer

Pour assurer la qualité et l'efficacité de l'impression. En positionnant correctement la pièce, on peut minimiser les supports nécessaires, ce qui réduit la consommation de matériau et le temps de l'impression. Une bonne orientation peut également améliorer l'adhérence à la

plateforme, réduisant ainsi le risque de décollement ou de déformation comme la position (C). De plus que notre pièce n'est pas destinée à l'utilisation, on la place de la manière (A) pour éviter les points faibles ou les défauts dans les zones critiques et minimiser l'utilisation de matériau de support, mais aussi ajuster les paramètres d'impression en jouant sur l'épaisseur de couche, le taux et le type de remplissage.

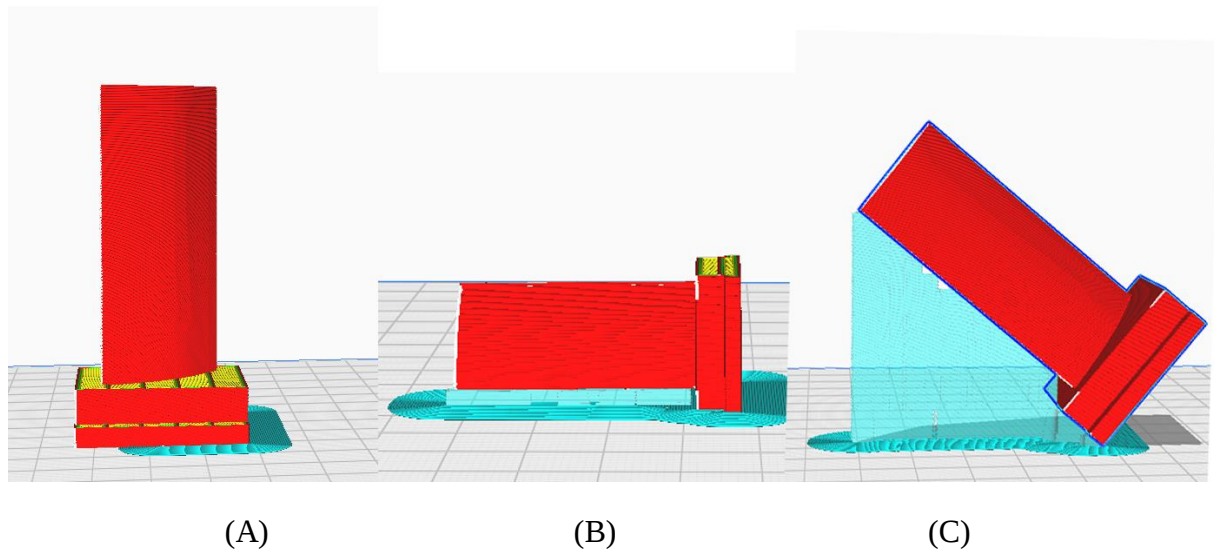


Figure IV.9 positionnement (A) (B) et (C) de la pièce

Dans Cas (A), la fabrication de la pièce ne consomme pas beaucoup de matière du support et ne prend pas beaucoup de temps, le contraire par rapport au cas (C) et (B).

IV.5.2.6. Exportation du fichier G-code

Une fois le découpage terminé, le logiciel génère un fichier au format G-code. Ce fichier contient toutes les instructions nécessaires pour que l'imprimante 3D produise l'objet en suivant les chemins et paramètres définis lors du découpage.

IV.5.3. Condition de travail

Certaines imprimantes 3D sont aujourd'hui très compactes et faciles à déplacer. Toutefois, il est préférable de choisir soigneusement leur emplacement et d'éviter de les déplacer fréquemment. L'environnement d'impression idéal est un espace sans poussière et à température constante. Par exemple, évitez d'installer votre machine à proximité d'un établi de menuiserie ou sur un bureau exposé aux courants d'air.

Le bureau doit être stable, sans vibrations, et à une hauteur suffisante pour surveiller l'impression en cours et effectuer les manipulations courantes : changement de filament, décollage de la pièce du plateau, ou nettoyage de la buse. Selon les modèles, il faut prévoir un accès facile à la bobine de filament, qui peut parfois se trouver à l'arrière de la machine.

De plus, votre espace de travail doit permettre d'avoir à portée de main les outils fréquemment utilisés (voir encadré suivant). Les différentes bobines de filament doivent être

facilement accessibles, ainsi qu'un bac de recyclage pour les échecs et résidus d'impression, qui peuvent alimenter un éventuel extrudeur. Un lecteur de carte SD peut être nécessaire en complément, ainsi que l'ordinateur, véritable tour de contrôle de l'impression. Un espace de travail d'environ 4 m² est généralement idéal.

Table IV-1 liste de matériel du poste d'impression 3D

Une station de travail bien équipée comporte généralement les accessoires et petits outillages suivants .
• Un tournevis pour ajuster la machine. • Des gants résistants à la chaleur, pour manipuler la tête d'impression. • Une chiffonnette en coton et une brosse cuivrée pour nettoyer la tête d'impression. • Une spatule pour retirer les impressions du plateau. • Un chiffon propre et du savon pour nettoyer les impuretés dans la machine. • Du produit adhésif : spray, colle, ruban bleu. • • une feuille de papier pour ajuster la hauteur de la tête d'impression.

IV.5.3.1. Mise en place de filament

On a choisi le filament de type PLA 1,75 mm de diamètre, appuyer sur le levier ressort de l'extrudeur et le pousser jusqu'à la buse. On peut voir la progression du fil jusqu'à la buse au travers du tube blanc translucide.

IV.5.3.2. Mise à niveau du plateau et calibrage de la tête d'impression

Une fois la machine installée, il est essentiel de mettre à niveau le plateau. Lors de l'impression de la première couche, certains signes peuvent indiquer un problème de mise à niveau, variations de hauteur et de largeur du dépôt de filament, lignes espacées, filament plus adhérent à certains endroits qu'à d'autres. Selon les modèles, la calibration peut être automatique ou manuelle.

Une fois le plateau correctement nivelé, il est nécessaire d'ajuster la hauteur de la tête d'impression. Certains indices révèlent qu'un calibrage est nécessaire. La tête d'impression est trop proche de la surface si :

La première couche est à peine visible ou très fine.

La tête entraîne le filament déjà déposé.

Le filament a tendance à s'enrouler autour de la buse.

Aucun filament ne sort de la tête.

Dans ces cas, il faudra légèrement remonter la tête d'impression.

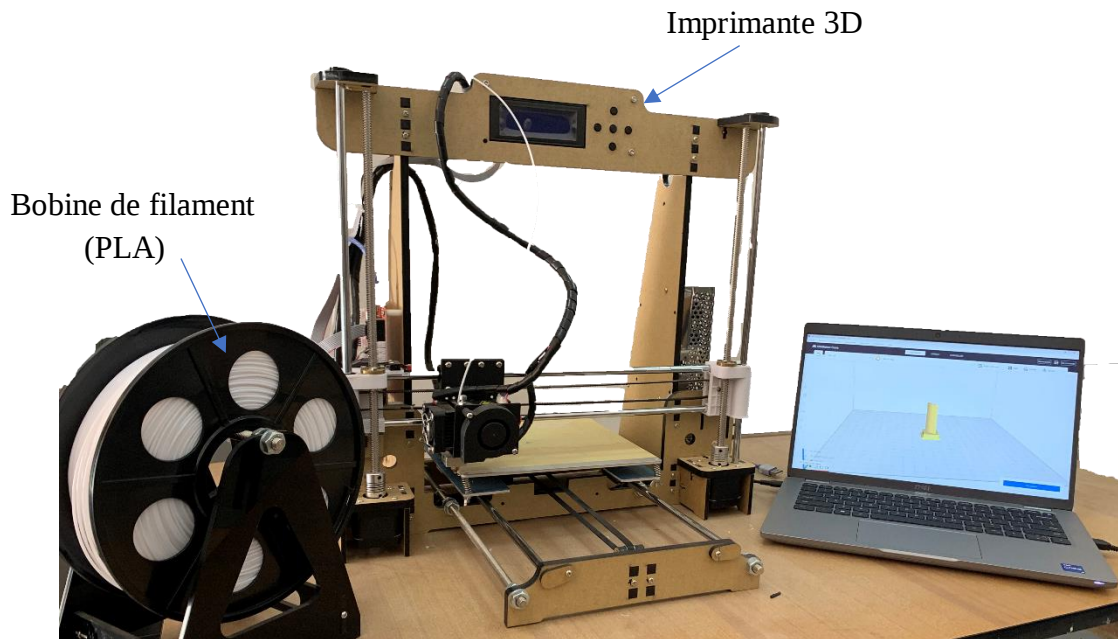


Figure IV.10 l'emplacement de matériel d'impression

IV.5.3.3. Réglage de la Température

Le réglage de la température d'impression sur une imprimante 3D FDM se fait généralement via l'écran de contrôle de l'imprimante.

La température de la Buse généralement entre 180°C et 220°C pour le PLA

La température du Plateau Chauffant à une valeur appropriée pour le PLA, généralement entre 50°C et 60°C.



Figure IV.11 Affichage de l'écran d'imprimante

IV.5.4. Préparation pour le lancement d'impression

On va faire la mise d'emplacement de Carte SD qui contient notre fichier format (G-Code).

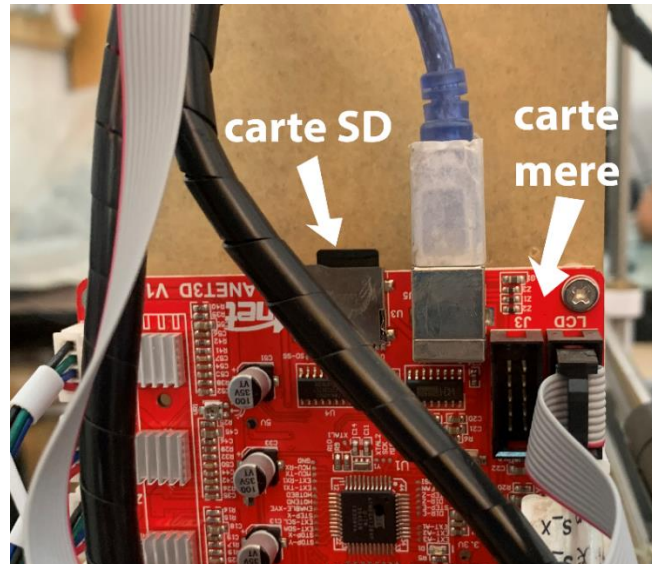


Figure placement de la carte SD dans la carte mère

IV.5.5. Lancement d'impression

Une fois La température de la Buse atteinte 200°C, La température du Plateau Chauffant 60°C. La tête d'impression va faire fondre le filament et se déplacer pour le déposer sur le plateau afin de créer notre objet en trois dimensions.

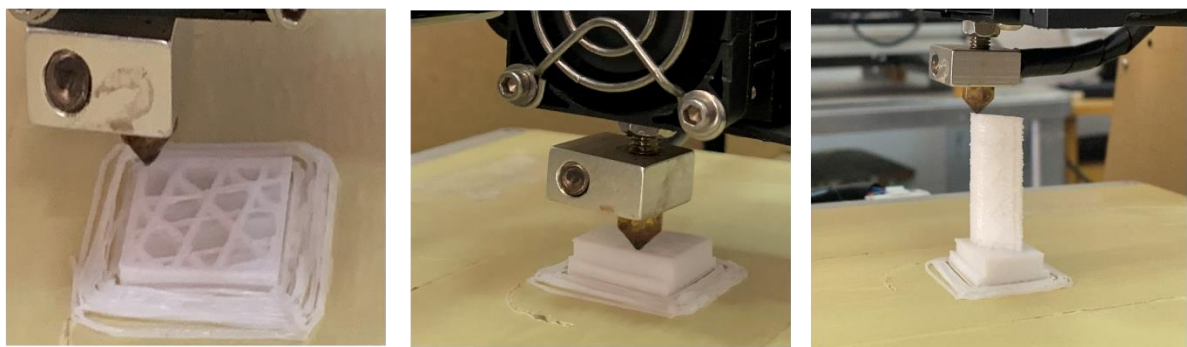


Figure IV.12 l'impression de la pièce

IV.5.6. Récupération de la pièce

Une fois l'impression terminée, il ne nous reste plus qu'à décoller notre objet du plateau. Il faut juste lui retirer les supports d'impression.

- **Analyse et discussion**

L'impression FFF est largement accessible, avec des imprimantes relativement peu coûteuses et faciles à utiliser. Un large choix de filaments permet d'adapter les propriétés de la pièce aux besoins spécifiques. Cependant, les pièces imprimées en FFF peuvent avoir des propriétés mécaniques anisotropes, avec des faiblesses dans la direction perpendiculaire aux couches imprimées.

IV.6. Avantages et Inconvénients de l'impression 3D

IV.6.1. Avantages de l'Impression 3D

- **Créer des géométries complexes**

Contrairement à l'usinage traditionnel, l'impression 3D permet de concevoir des pièces aux géométries complexes impossibles à réaliser avec des méthodes conventionnelles. Par exemple, les vides internes peuvent alléger les produits, ce qui est particulièrement avantageux dans les secteurs de l'aérospatiale, de la défense et de l'automobile. En utilisant des matériaux coûteux comme les métaux, ces vides permettent également des économies significatives.

- **Ingénierie de conception et de fabrication**

L'impression 3D simplifie la création de pièces en éliminant les contraintes des technologies de fabrication soustractives. Les ingénieurs gagnent du temps, les pièces complexes étant fabriquées en une seule fois sans nécessiter plusieurs composants ou réglages multiples. Cela réduit le temps et les coûts de production.

- **Fabrication efficace**

L'impression 3D est un processus en une seule étape, évitant de nombreuses opérations et réduisant la consommation d'énergie. Elle génère peu de déchets et peut être automatisée pour produire en continu. Les coûts d'entreposage et de transport sont réduits, tout comme les coûts de détention des stocks. Les services de sous-traitance locaux permettent aux entreprises d'économiser sur les investissements en capital et les développements de procédés.

- **Matériaux légers**

Les matériaux utilisés en impression 3D, souvent des plastiques légers et des matériaux d'ingénierie, peuvent être personnalisés pour offrir des performances spécifiques, telles que la résistance chimique, thermique, l'élasticité ou la solidité.

- **Peu de déchets matériels**

Contrairement à la fabrication soustractive, l'impression 3D ajoute seulement le matériau nécessaire à la pièce, réduisant ainsi les déchets. De plus, beaucoup de filaments sont recyclables et les matériaux en poudre sont réutilisables à 95%-99%.

- **Création rapide de pièces**

Les pièces peuvent être imprimées en quelques heures, réduisant les coûts de stockage et les délais d'expédition.

- **Prix raisonnable de l'équipement**

Les imprimantes 3D sont plus abordables que les équipements de fabrication traditionnels. Les machines d'entrée de gamme commencent à environ 200 dollars, et même les machines industrielles coûtent moins que les centres d'usinage CNC. Bien que les matériaux puissent sembler coûteux, leur utilisation optimisée réduit les coûts globaux.

- **Durabilité**

Le procédé est respectueux de l'environnement, utilisant moins de matériaux et permettant le recyclage de nombreux supports plastiques. Les pièces plus légères améliorent l'efficacité énergétique des véhicules.

IV.6.2. Inconvénients de l'Impression 3D

- **Précision**

Les pièces produites par impression 3D n'atteignent pas encore la précision dimensionnelle des machines CNC, avec une tolérance d'environ 0,2 mm contre 0,005 mm pour les CNC. Cependant, des améliorations constantes sont en cours.

- **Coût**

Bien que les imprimantes 3D soient moins chères que leurs homologues de fabrication soustractive, l'investissement dans cette nouvelle technologie implique des coûts en équipements, formation et développement de procédés.

- **Contrefaçons et violations des droits d'auteur**

La popularité croissante de l'impression 3D augmente le risque de produits contrefaits et de violations des droits d'auteur, avec des modèles souvent téléchargés sans compensation pour les créateurs originaux.

- **Élimination de la main-d'œuvre**

L'impression 3D réduit la nécessité de main-d'œuvre, car un seul opérateur peut gérer plusieurs machines.

- **Disponibilité des matériaux**

Le choix de matériaux pour l'impression 3D est limité par rapport aux procédés traditionnels. Beaucoup d'alliages métalliques et matériaux compatibles alimentaires doivent encore être adaptés pour l'impression 3D. Les matériaux thermodurcissables, non recyclables, posent également un problème de déchets.

- **Qualité des pièces**

Certaines technologies d'impression 3D, comme FDM, peuvent produire des pièces dé laminées, fragiles ou présentant des problèmes dimensionnels et de contraintes internes.

- **Post-traitement**

La plupart des pièces imprimées en 3D nécessitent un post-traitement, comme le traitement thermique, le polissage ou l'usinage, augmentant le temps et les coûts de production.

- **Volume de production**

L'impression 3D est plus lente que les méthodes de production de masse traditionnelles. Bien qu'elle puisse produire des volumes faibles à moyens, elle n'est pas aussi rapide que les procédés traditionnels pour les grandes séries.

- **Taille**

Les imprimantes 3D industrielles sont limitées par la taille de leurs chambres d'impression, restreignant la taille des produits qu'elles peuvent fabriquer.

IV.7.Conclusion

La mise en œuvre de l'impression 3D en utilisant la méthode de reverse engineering représente une avancée significative dans le domaine de la fabrication et de la conception. Cette approche permet de reproduire et d'améliorer des pièces existantes avec une précision et une rapidité accrues. En numérisant des objets physiques pour créer des modèles numériques détaillés, les ingénieurs et les concepteurs peuvent analyser et optimiser les conceptions pour améliorer les performances et la durabilité des pièces. L'intégration de l'impression 3D avec le reverse engineering offre de nombreux avantages. Elle permet de réaliser des économies substantielles en réduisant les temps de développement et les coûts de production. Les pièces complexes peuvent être recréées et personnalisées selon les besoins spécifiques, ce qui est particulièrement utile dans des secteurs tels que l'aérospatiale, l'automobile et la médecine. De plus, cette méthode facilite la réparation et la reproduction de pièces obsolètes ou difficiles à obtenir, prolongeant ainsi la durée de vie des équipements et des systèmes. Cependant, la combinaison de l'impression 3D et du reverse engineering présente aussi des défis. La précision de la numérisation et de l'impression doit être constamment améliorée pour garantir des résultats de haute qualité. Les coûts initiaux d'investissement dans les équipements de numérisation 3D et les imprimantes 3D peuvent également être élevés, nécessitant une évaluation minutieuse des besoins et des avantages pour chaque projet. Malgré ces défis, les perspectives offertes par cette approche sont extrêmement prometteuses. Les progrès technologiques continus en matière de scanners 3D, de logiciels de modélisation et d'imprimantes 3D amélioreront encore la précision, la rapidité et l'efficacité de ce processus. Les entreprises qui adoptent cette technologie peuvent espérer une flexibilité accrue dans la conception et la production, une meilleure gestion des coûts et un avantage concurrentiel sur le marché. En conclusion, la mise en œuvre de l'impression 3D par reverse engineering est une stratégie innovante qui redéfinit les standards de la fabrication moderne. En capitalisant

sur les synergies entre ces deux technologies, les industries peuvent transformer leurs processus de conception et de production, ouvrant la voie à de nouvelles possibilités d'innovation et d'efficacité.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

le processus de scanner, modéliser et imprimer en 3D une aube de turbine constitue une avancée majeure pour l'industrie des turbines, apportant des améliorations significatives à plusieurs niveaux. Premièrement, cette méthode permet de créer des répliques précises pour la réparation et le remplacement des aubes, ce qui est essentiel pour minimiser les interruptions et les coûts opérationnels. Grâce à la numérisation, les moindres détails de la géométrie de l'aube sont capturés, assurant une reproduction fidèle.

Deuxièmement, la modélisation 3D offre une opportunité unique d'optimiser la conception des aubes. En utilisant des logiciels de simulation avancés, les ingénieurs peuvent analyser les performances aérodynamiques et mécaniques des aubes, permettant ainsi de repérer des points faibles et de tester virtuellement des améliorations avant de passer à la phase de fabrication. Pour affiner ces modèles, la méthode des moindres carrés est souvent employée pour ajuster les données et minimiser les erreurs, assurant ainsi des simulations et des analyses plus précises. Cette capacité à perfectionner la conception grâce à des outils mathématiques robustes contribue à des turbines plus efficaces et plus durables.

Enfin, l'impression 3D permet de produire rapidement des prototypes et de tester différentes configurations avant de valider une conception finale. Cette agilité dans la fabrication accélère le processus d'innovation, permettant de passer rapidement de l'idée à la réalisation. Les entreprises peuvent ainsi adapter les aubes aux conditions spécifiques d'utilisation, répondant mieux aux besoins particuliers de chaque application.

Référence bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Ahmed, M. « L'application des technologies de reverse engineering dans la fabrication des aubes de turbines à gaz » 2019
- [2] DJABRI MALEKEDDINE « Etude numérique des caractéristiques géométriques des aubes à action des turbines » 2015
- [3] OURADJ Mohamed « Contrôle de qualité d'une aube de turbine en exploitant la Méthode ICP » 2018
- [4] Salam ALI « La Rétro-conception de composants mécaniques par une approche « concevoir pour fabriquer » le 1er juillet 2015
- [5] Lefevre, Anne « Évaluation de la précision des techniques de scan 3D pour la rétro-ingénierie » École des Mines de Saint-Étienne, 2019.
- [6] Brun, Nicolas « Étude des défis techniques du reverse engineering pour les pièces industrielles complexes » Université de Strasbourg, 2021.
- [7] Jean Dupont « Application des techniques de rétro-ingénierie et de fabrication additive dans la reproduction de pièces mécaniques » 2018
- [8] Marie Leroy « Techniques avancées de reverse engineering et impression 3D pour la fabrication de pièces de rechange » 2019
- [9] Martin, Sophie « Optimisation des processus de rétro-ingénierie pour les applications industrielles » Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2017.
- [10] Dupont, Jean « Application des techniques de rétro-ingénierie et de fabrication additive dans la reproduction de pièces mécaniques » Université de Technologie de Compiègne, 2018.
- [11] Salam ALI « La Rétro-conception de composants mécaniques par une approche concevoir pour fabriquer » le 1er juillet 2015
- [12] Brun, Nicolas « Étude des défis techniques du reverse engineering pour les pièces industrielles complexes » Université de Strasbourg, 2021.
- [13] Martin, Jean-Baptiste « Application des nuages de points dans l'archéologie : Reconstitution numérique de sites historiques » 2018
- [14] Dubois, Sophie « Techniques de filtrage et de dé bruitage dans les nuages de points 3D pour la modélisation numérique »
- [15] Martin, Claire « Optimisation de la conception assistée par ordinateur en utilisant SolidWorks » 2017

[16] Dupuis, Claire « Conversion de fichiers CAO en STL pour le prototypage rapide : défis et solutions » École Centrale de Lille 2014

[17] Josef Prusa. «Les bases de l'impression 3D » 2019

[18] Johnson, Robert «The Role of XYZ File Format in Modern 3D Scanning and Modeling»

[19] Paul J. Besl et Neil D. McKay « Application de la méthode des moindres carrés dans l'ajustement de modèles géométriques »

[20] Leroy, Camille « Optimisation de l'ajustement de courbes par la méthode des moindres carrés » Bordeaux

[21] Sophie Martin « Analyse comparative des technologies d'impression 3D et leur application dans l'industrie manufacturière »2019

[22] Lefèvre, Julie « Étude comparative des propriétés mécaniques et thermiques du PLA et de l'ABS en impression 3D »

[23] Dupuis, Marc « Influence de l'orientation de la pièce sur les propriétés mécaniques et la qualité de surface en impression 3D FDM » 2019

[24] Clark, Emily «Effects of Layer Orientation on Mechanical Properties of 3D Printed PLA and ABS Materials»

[25] Slicing Pierre Dupont 2020 « Analyse et optimisation des paramètres de découpage pour l'impression 3D FDM »

[26] Mathilde Berchon « le grand livre de l'impression 3d » editions-eyrolles 2019.