
People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Fabrication mécanique et productique

Présenté par :

BIDI Tarek

Thème

RETROCONCEPTION DES PIECES DE FORMES COMPLEXES

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
MAKRI Hocine	MCA	Président
SLAMANI Mohamed	Prof	Encadreur
AMROUNE Saleh	Prof	Examineur

Année Universitaire : 2022 / 2023

N° d'ordre : GM/...../2022

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude envers Dieu (Allah), notre créateur, pour m'avoir accordé la force d'accomplir ce travail.

Je souhaite également exprimer mes chaleureux remerciements à mon encadreur, le **Dr Mohamed SLAMANI**, pour sa guidance et son soutien inestimables tout au long de ce projet. Votre expertise, votre dévouement et vos conseils éclairés ont été des éléments essentiels à la réussite de mon travail. Grâce à votre encadrement, j'ai pu approfondir mes connaissances et développer des compétences précieuses dans mon domaine d'étude.

Je suis également reconnaissant envers les membres du jury qui évalueront ma mémoire de fin d'études. Je suis conscient de l'importance de leurs contributions et de leurs retours lors de la soutenance, et je suis honoré d'avoir l'opportunité de partager mes idées devant un panel aussi compétent. Je les remercie par avance pour leur temps, leur expertise et l'attention qu'ils porteront à mon travail.

J'aimerais également exprimer ma gratitude et mes sincères remerciements au **Dr Noureddine MENASRI**, Maître de conférences à l'Université de M'sila. Il est considéré comme l'une des raisons les plus importantes qui m'ont incité à reprendre des études universitaires, et je le remercie pour son soutien, son encouragement et sa motivation qui m'ont permis de mener à bien ce parcours académique.

Enfin, j'adresse mes remerciements à mon institution d'enseignement pour les ressources mises à ma disposition. Je suis reconnaissant envers tous les membres du corps professoral et du personnel administratif qui ont créé un environnement propice à l'apprentissage et à la recherche.

B.I.D.J. Tarek

Sommaire

Sommaire	i
Abréviations	iv
Liste des figures	v
Liste des tableaux	viii
Introduction générale.....	01
Chapitre I : Généralité sur la rétro conception	
I.1.Introduction	04
I.2.Historique	04
I.3.Définition de la rétro conception	05
I.4. Les raisons industrielles de la rétro-conception	05
I.5. Principe de Retro-conception des pièces de formes complexes	06
I.5.1. Phase 1 : L'acquisition des données numériques 3D	07
I.5.2. Phase 2 : Triangulation	07
I.5.3. Phase 3 : Rétro-conception	07
I.6. Cycle de développement d'un produit	08
I.6.1. Cycle de développement d'un produit en général	08
I.6.2. Cycle de développement d'un produit par rétroconception	09
I.6.3. La rétro-conception conventionnelle	11
I.6.3.1. Processus classique d'acquisition des données pour fabriquer	11
I.6.3.2 Inconvénients du processus classique d'acquisition des données	12
I.6.4. Rétro-conception moderne	12
I.6.4.1. Processus moderne d'acquisition des données	12
I.6.4.2. Avantages du processus moderne d'acquisition des données	13
I.7. Etapes de rétroconception	13
I.8.Nuages de points	14
Chapitre II : Principales technologies de numérisation 3D	
II.1. Introduction	17
II.2. Les scanners 3D	17
II.3. Les avantages de numérisation	17
II.4. Les limites de la numérisation dans la construction	18
II.5. Numérisation tridimensionnelle	18
a. Avec contact	19
b. Sans contact	19
II.5.1. Principe général de fonctionnement d'un scanner 3D	20
II.5.2. Technique de numérisation par contacts	21
II.5.2.1. Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT)	21
II.5.2.2. Bras poly articulé	22
II.5.3. Technique de numérisation sans contact	22
II.5.3.1. Technologie de scan 3D photogrammétrie (photographie)	22
II.5.3.1.1. Principe de la photogrammétrie	23
II.5.3.1.2. La triangulation	23
II.5.3.1.3. Photogrammétrie métrique sans équipement spécialisé	24
II.5.3.1.4. La photogrammétrie pour l'ingénierie	25
II.5.3.2. Technologie de scan 3D triangulation laser	26
II.5.3.2.1. Triangulation	26

II.5.3.2.2. Fonctionnement du système CMS106 sur une MMT	27
II.5.3.2.3. Rétro-ingénierie	28
II.5.3.2.4. Contrôle qualité	29
II.5.3.3. Technologie de scan 3D par lumière structurée	29
II.5.3.3.1. Transformer la lumière réfléchie en modèles 3D en haute résolution	29
II.5.3.3.2. Systèmes à lumière structurée ou modulée	30
II.5.3.4. Technologie de scan tomographie à rayons X	31
II.5.3.4.1. Principe de la tomographie	31
II.5.3.4.2. Les applications industrielles	32
II.5.3.4.3. Réaliser des contrôles dimensionnels	33
Chapitre III : Les logiciels de contrôle et traitement des nuages de points	
III.1. Introduction	36
III.2. Développement des logiciels de contrôle et traitement des nuages de points	36
III.3. Algorithmes de traitements de nuages de points	37
III.4. Geomagic	38
III.4.1. Les logiciel Geomagic	38
III.4.1.1. Geomagic Design X	39
III.4.1.2. Logiciel Geomagic Wrap	40
III.4.1.3. Geomagic control X	40
III.4.1.4. Geomagic for SOLIDWORKS	41
III.4.1.5. Logiciel Geomagic Freeform	42
III.5. Logiciel Cam2 Measure	43
III.6. Logiciel COMET plus	44
III.7. Logiciel Polyworks	44
III.8. Logiciel Gom inspect	45
III.9. Logiciel 3D Reshaper	46
III.10. Logiciel PC-DIMIS	47
III.10.1. La gamme des logiciels PC-DMIS	47
Chapitre IV : Mesure et modélisation des pièces de formes complexes	
IV.1. Introduction	50
IV.2. Mesure tridimensionnelle des pièces de formes complexes	50
IV.2.1 Mesure par contacte (palpage)	50
IV.2.1.1 Palpeur	51
IV.2.1.1.1 Palpeur électronique	51
- Algorithmes	52
IV.2.1.1.2 Palpeur rigide	52
IV.2.2 Mesure à distance	53
IV.3 Modélisation des surfaces	54
IV.3.1 Les courbes paramétriques	54
IV.3.1.1 Courbe de Bézier	54
IV.3.1.2 Courbe B-Spline	56
IV.3.1.3 Courbe NURBS	57
IV.3.2 Les surfaces paramétriques	59
IV.3.2.1 Surface de Bézier	60
IV.3.2.2 Surface de B-spline	60
IV.3.2.3 Surface NURBS	61
IV.4 Reconstruction de surface	63
IV.4.1 Méthodes de reconstruction	63
IV.4.2 Les Algorithmes de reconstruction de surface	64

Chapitre V : Partie expérimentale (Rétroconception ailette turbine)

V.1. Introduction	67
V.2. Les turbine	67
V.2.1. Les aubes de turbine	68
V.2.2. Description de la pièce à étudier (ailette turbine fixe partie chaude)	68
V.3. La pièce à étudier	69
V.3.1. Equipements utilisés	69
V.3.1.1. Scanner de lumière bleue 3D	69
V.3.1.1.1. Caractéristique	70
V.3.1.1.2. Machine à mesure tridimensionnelle MMT	70
V.3.1.1.3. Logiciel de traitement	70
V.3.2. Processus de travail	71
V.3.2.1. Phase de numérisation 3D	71
- Opération de numérisation	72
- Méthodologie suivie	72
V.3.2.2. Traitement avec COMET plus	74
V.3.2.3. Phase de traitements avec logiciel Geomagic design X	74
- Méthodologie algorithme de travail GEOMAGIC Design X	75
- Importation du nuage de points dans GEOMAGIC Design X	75
- Traitement du scan	75
- Reconstruction de la pièce	76
V.3.3 Evaluation de la précision	80
V.3.3.1 Analyse de déviation (nuage de points par rapport au CAO)	80
V.3.3.1.1. Résultats et discussions	81
V.3.3.2. Contrôle du model CAO par apport à la pièce modèle sur MMT	83
V.3.3.2.1. Résultats et discussions	85
V.4. Conclusions	85
Conclusion Générale	86
Annexe	88
Références bibliographiques	97
Résumé	99

Abréviations

MMT : Machine à mesure tridimensionnelle

CMM : Coordinate Measuring Machine

RC : Retro-conception

RE : Reverse engineering

TG : Turbine à gaz

3D : Trois dimensions

CAO : Conception assistée par ordinateur

NURBS : Non-Uniform Rational Basis Spline

IGES : Intial Graphics Exchange Specification ;

CAD : Computer-aided design

STL : “Standard Triangle Language” ou même “Standard Tessalation Language”

CCD : Charge coupled device (dispositif à couplage de charge)

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1 : Rétro-conception d'une aube de turbine usée	05
Figure I.2 : Principe numérisation 3D	07
Figure I.3 : Cycle de développement d'un produit	09
Figure I.4 : Cycle de développement d'un produit par rétroconception	10
Figure I.5 : Rétro-conception conventionnelle	11
Figure I.6 : Instruments classiques utilisés pour d'acquisition des données	11
Figure I.7: Appareils moderne utilisés pour l'acquisition des données	13
Figure I.8: Nuages des points	15

CHAPITRE II

Figure II-1 : les objets assez complexes à scanner	19
Figure II-2 : Différentes technologie de numérisation	20
Figure II-3 : principe d'un détecteur utilisant la triangulation laser	20
Figure II-4: Numérisation 3D par machine à mesurer tridimensionnelles (MMT)	21
Figure II-5 : Exemple d'un système combinant un palpeur et une tête laser ligne sur bras Polyarticulé	22
Figure II-6 : La photogrammétrie (les appareils photos et les drones)	23
Figure II-7 : Schéma de principe de la photogrammétrie	23
Figure II-8 : Identification des points par triangulation	24
Figure II-9 : Kit de photogrammétrie complet spécialement conçu pour les applications liées aux mesures	24
Figure II-10 : Les barres d'échelle (cibles)	25
Figure II-11 : La photogrammétrie métrique	25
Figure II-12 : Des cibles sont collées sur l'objet pour faciliter l'identification et l'alignement des zones superposables parmi les images	26
Figure II-13:scanners triangulation laser	26
Figure II-14 : Principe de mesure triangulaire	27
Figure II-15 : Système CMS106 sur MMT	27
Figure II-16 : Numérisation avec CMS106	28
Figure II-17 : Rétroconception des aubes de turbine	28
Figure II-18 : les scanners 3D portable	29
Figure II-19 : Scan 3D robotisée (lumière structurée)	30
Figure II-20 : Motifs de lumière structurée codés par la couleur	30
Figure II-21: tomographie industrielle à rayons x	31
Figure II-22 : Principe de la tomographie	32
Figure II-23 : Les applications industrielles	33
Figure II-24 : Inspection des aubes de turbine	34

CHAPITRE III

Figure III.1 : Gamme des logiciels Geomagic	38
Figure III.2 : Logiciel Geomagic Design X	39
Figure III.3 : Logiciel Geomagic Wrap	40
Figure III.4 : Logiciel Giomagic Contrôle X	41
Figure III.5: Logiciel Geomagic for SOLIDWORKS	42

Figure III.6: Logiciel Geomagic Freeform	43
Figure III.7 : Logiciel Cam2 Measure	43
Figure III.8 : Logiciel COMET plus	44
Figure III.9: Logiciel Polyworks	45
Figure III.10: Logiciel Gom inspect	46
Figure III.11 : Logiciel 3DReshaper	46
Figure III.12 : Logiciel PC-DIMIS	47

CHAPITRE IV

Figure IV.1: Exemple d'enlèvement des profils sur la pale d'un aube turbine	51
Figure IV.2: Palpeur à déclenchement par contact TP1	52
Figure IV.3: les palpeurs rigides pour bras articulé	53
Figure IV.4: Exemple mesure à distance sur (MMT)	53
Figure IV.5: Exemple de courbe de Bézier	55
Figure IV.6: Exemple de modélisation de courbe complexe	56
Figure IV.7: lien avec les Béziérs	57
Figure IV.8: Représentation de cercles par des courbes NURBS	58
Figure IV.9: Exemple de courbe NURBS	59
Figure IV.10: Surface paramétrique	59
Figure IV.11: Exemple un patch cubique du troisième degré de Bézier construit sur $4 \times 4 = 16$ points de contrôle	60
Figure IV.12: Exemple surface B-Spline avec 6×6 points de contrôle	61
Figure IV.13: Surface NURBS définie par un réseau de contrôle	63
Figure IV.14: Exemple de reconstruction par la méthode de Delaunay pour différents nombres de points	63
Figure IV.15: Exemple de reconstruction par la méthode des contours actifs	64
Figure IV.16: Exemple de maillage utilise, avec adaptation anisotrope autour des points de V	64
Figure IV.17: Exemple des trois phases de la méthode de reconstruction de surface	65

CHAPITRE V

Figure V.1: Turbine à gaz	67
Figure V.2: Aubes turbine	68
Figure V.3: Une partie d'un compresseur axial	68
Figure V.4: la pièce à étudier (ailette turbine fixe partie chaude)	69
Figure V.5: Scanner COMET L2D de STENIBICHLER	69
Figure V.6: Processus de travail	71
Figure V.7: Préparation de l'endroit et de la pièce	71
Figure V.8: Table rotative double COMET	72
Figure V.9: Organigramme de la méthodologie suivie	73
Figure V.10: Formation de nuages de points	74
Figure V.11: Organigramme explicatif de la méthodologie de travail par GEOMAGIC	75
Figure V.12: Importation du nuage de points format STL dans Geomagic Design X	76
Figure V.13: Traitement du scan	76
Figure V.14: Extraire les régions	77
Figure V.15: Alignement interactif	77
Figure V.16: Construction des deux côtés, concave et convexe	78
Figure V.17: Esquisse de maillage	78
Figure V.18: Construire les pales	79
Figure V.19: Perçage des trous de refroidissement	79
Figure V.20: Reconstruction des rainures par enlèvement de la matière	79

Figure V.21: Résultat finale de la réalisation du model CAO sur SolidWorks	80
Figure V.22: Analyse de déviation	80
Figure V.23: Emplacement de la pièce sur le marbre de la MMT	83
Figure V.24: Importation du model CAO sur logicielle PC-DMIS	83
Figure V.25: Alignement itérative et le choix de 6 points sur CAO	84
Figure V.26: Contrôle de la pièce	84

Liste des tableaux

CHAPITRE V

Tableau V.1: Alignement CAO – nuage de points	81
Tableau V.2: Données de résultats comparaison bondage côté concave	81
Tableau V.3: Données de résultats comparaison bondage côté convexe	82
Tableau V.4: Données de résultats comparaison encoche côté concave et convexe	82
Tableau V.5: Résultat obtenus par mesure sur MMT	85

Introduction générale

Avec le développement de l'industrie, ses complications augmentent, notamment dans le domaine de la conception des pièces mécaniques, des pièces simples aux pièces complexes en passant par des pièces plus complexes, ce qui nous oblige à faire plus d'efforts et à développer la technologie pour faire face à cette nouvelle donne.

Le développement des appareils de mesure tridimensionnels a été une avancée majeure dans le domaine de la métrologie. Ces appareils permettent de mesurer avec précision les dimensions et les formes des objets en trois dimensions, ce qui est particulièrement utile pour les pièces complexes telles que celles utilisées dans l'aérospatiale, l'automobile ou la fabrication de moules.

Les appareils de mesure tridimensionnels utilisent différentes techniques pour mesurer les objets en trois dimensions. Parmi les techniques les plus courantes, on peut citer la mesure par contact, qui utilise une sonde pour mesurer les dimensions de l'objet, et la mesure sans contact, qui utilise des techniques telles que la lumière structurée ou la tomographie pour mesurer l'objet sans l'endommager.

Ces appareils ont considérablement amélioré la précision et la rapidité des mesures tridimensionnelles par rapport aux méthodes manuelles ou semi-automatiques. Ils permettent également de collecter une grande quantité de données en peu de temps, ce qui est utile pour les processus de contrôle qualité ou de développement de produits.

Le développement accru des logiciels de traitement des nuages de points a permis de traiter de manière plus efficace les données tridimensionnelles pour la rétroconception, la modélisation 3D, l'analyse de contraintes et la documentation de sites historiques. Ces logiciels permettent également de simplifier les données pour améliorer les performances de traitement, tout en conservant l'exactitude des données essentielles.

Pour exploiter ces programmes et ces moyens modernes, la science de l'ingénierie inverse ou la rétroconception a été créée, cette science vise à recréer un modèle 3D précis de la pièce à partir d'un objet physique existant. Cette approche est souvent utilisée lorsque les plans d'origine de la pièce ne sont pas disponibles ou lorsqu'il est difficile de les obtenir.

La rétroconception de pièces de formes complexes peut être un défi, car il peut être difficile de déterminer les dimensions et les tolérances exactes d'une pièce existante. Les techniques couramment utilisées pour la rétroconception incluent la numérisation 3D, la mesure dimensionnelle, l'analyse de contrainte et la simulation de l'usure. Ces techniques peuvent aider à reproduire avec précision les pièces de formes complexes existantes et à les améliorer pour répondre aux exigences actuelles.

La rétro-conception des pièces de forme complexe peut apporter de nombreux avantages, tels que la réduction des coûts, l'amélioration de la qualité et l'optimisation de la

conception, permettant ainsi d'assurer le bon fonctionnement des machines et des équipements, tout en respectant les normes et réglementations en vigueur.

L'objectif de ce mémoire est de présenter une conception 3D des pièces de formes complexes, allant de la reproduction de pièces existantes à l'optimisation de la conception, en passant par la compréhension de la conception, la réduction des coûts et le respect des normes et réglementations.

Ce mémoire présente l'utilisation des technologies les plus récentes pour la mesure et la modélisation de pièces de formes complexes, en utilisant des outils de mesure tridimensionnelle et des logiciels de traitement de nuages de points. L'étude est organisée en cinq chapitres pour offrir une analyse complète de l'approche.

Le premier chapitre consiste en une étude théorique sur la rétroconception, en se concentrant sur le fonctionnement de ce principe, le cycle de développement d'un produit et la comparaison entre les méthodes anciennes et modernes.

Le deuxième chapitre présente les principales technologies de numérisation 3D, en mentionnant les types de numérisation et leurs divisions, ainsi que le principe général de fonctionnement d'un scanner 3D et la technique de numérisation associée à chaque technologie.

Le troisième chapitre présente les logiciels les plus importants dans le domaine du contrôle et de la numérisation 3D, ainsi que le traitement de nuages de points. Cette section explique le développement de ces logiciels ainsi que leur utilisation d'algorithmes.

Le quatrième chapitre étudie les types de mesures tridimensionnelles, par contact et à distance, dans les pièces de formes complexes. Il examine la modélisation à l'aide de surfaces de Bézier, B-Spline et NURBS, afin de reconstruire ces pièces.

Enfin, dans le cinquième et dernier chapitre, une étude expérimentale a été menée sur une pièce de forme complexe (ailette turbine fixe partie chaude 1er étage), dans le but de démontrer la capacité à maîtriser ces technologies modernes en procédant à une évaluation de la précision.

La conclusion générale explique le processus de rétroconception des pièces de formes complexes.

CHAPITRE I

Généralité sur la rétro conception

I.1.Introduction

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

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

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

I.2.Historique :

L'histoire de la rétroconception remonte aux années 1960 et 1970, lorsque les premières approches de la rétroconception ont été développées pour améliorer la production de produits déjà existants. Ce processus a été initialement développé pour les produits industriels, tels que les machines et les équipements, mais s'est rapidement étendu à d'autres industries, notamment l'automobile et l'aéronautique.

Au fil des ans, la rétroconception est devenue de plus en plus populaire en raison de ses avantages en termes de coûts, de développement rapide et d'amélioration de la qualité. Les entreprises ont commencé à adopter la rétroconception pour créer de nouveaux produits plus rapidement et à moindre coût, tout en améliorant les produits existants.

Avec l'avènement de la technologie numérique, la rétroconception s'est encore améliorée. Les entreprises peuvent désormais utiliser des outils de CAO, de simulation et de modélisation pour collecter, stocker et utiliser les données sur les produits existants. Cela leur permet de créer de nouveaux produits plus rapidement et avec une meilleure précision.

En somme, la rétroconception est devenue une technique largement utilisée dans de nombreuses industries et est considérée comme un moyen efficace et rentable de développer de nouveaux produits. De nos jours, les entreprises continuent d'adopter la rétroconception pour améliorer leurs produits existants, adapter des produits existants à de nouveaux marchés et créer de nouveaux produits à moindre coût.

I.3. Définition de la rétro conception

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

C'est l'inverse du processus de conception. Elle consiste en la reconstruction d'un modèle de conception basé sur un produit réel. [1]

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

I.4. Les raisons industrielles de la rétro-conception :

La rétro-conception peut concerner des objets aussi grands que l'avion jusqu'aux plus petits comme la puce électronique. La rétro-conception est présente à de nombreuses étapes du cycle de vie d'un produit. Cette généralisation s'explique par l'amélioration des techniques de numérisation et des performances de calculs de reconnaissances géométriques. Au cours des années, plusieurs raisons industrielles concrètes peuvent être recensées. Nous citons les raisons les plus importantes :

- Composants usés ou cassés pour lesquels il n'y a aucune source d'approvisionnement. Ce contexte concerne les pièces plus ou moins anciennes qui ont subi un changement dans leurs géométries dû à des usures ou cassures (Figure I.1).



Figure I.1 : Rétro-conception d'une aube de turbine usée

- Le fabricant d'origine n'existe plus, mais un client a besoin du produit, par exemple, des pièces de rechange d'avion requises généralement après qu'un avion a été en service pendant plusieurs années.
- Le fabricant d'origine d'un produit ne fabrique plus le produit, par exemple, le produit d'origine est devenu obsolète.
- La documentation de conception originale du produit a été perdue ou n'a jamais existé.
- Créer des données pour remettre à neuf ou fabriquer une pièce pour laquelle il n'existe pas de données CAO, ou pour laquelle les données sont devenues obsolètes ou perdues.
- Inspection et/ou contrôle qualité – Comparaison d'une pièce fabriquée à sa description CAO ou à un article standard.
- Certaines mauvaises caractéristiques d'un produit doivent être éliminées, par exemple, une usure excessive peut indiquer où un produit doit être amélioré.
- Renforcer les bonnes caractéristiques d'un produit basé sur une utilisation à long terme.
- Analyser les bonnes et les mauvaises caractéristiques des produits des concurrents.
- Explorer de nouvelles voies pour améliorer les performances et les fonctionnalités des produits.
- Création de données 3D à partir d'un modèle ou d'une sculpture pour l'animation de jeux et de films.
- Création de données 3D à partir d'un individu, d'un modèle ou d'une sculpture pour créer, mettre à l'échelle ou reproduire une œuvre d'art.
- Documentation et mesurage d'architecture et de construction.
- Adapter des vêtements ou des chaussures à des individus et déterminer l'anthropométrie d'une population.
- Génération de données pour créer des prothèses dentaires ou chirurgicales, des parties du corps issues de l'ingénierie tissulaire ou pour la planification chirurgicale.
- Documentation et reproduction de scènes de crime [3].

I.5. Principe de Retro-conception des pièces de formes complexes :

Le principe de base de la rétroconception de pièces de formes complexes est de recueillir des données précises sur l'objet existant, puis de les utiliser pour créer des dessins et des spécifications précis pour la reproduction ou la modification de cet objet. Cela peut être accompli en utilisant une combinaison de techniques telles que la numérisation 3D, la mesure dimensionnelle, l'analyse de contrainte et la simulation de l'usure.

La numérisation 3D permet de créer un modèle numérique précis de l'objet existant en utilisant des capteurs tels que la laser scanning ou la photogrammétrie. La mesure dimensionnelle permet de déterminer les dimensions et les tolérances précises de l'objet existant, tandis que l'analyse de contrainte permet de déterminer les forces et les charges auxquelles l'objet est soumis. Enfin, la simulation de l'usure permet de déterminer comment l'objet se comporte au fil du temps et de prendre en compte ces facteurs lors de la conception de la pièce.

Une fois que les données précises ont été recueillies, elles peuvent être utilisées pour créer des dessins et des spécifications précis pour la reproduction ou la modification de l'objet existant. Cela peut inclure l'utilisation de logiciels de CAO (Conception assistée par ordinateur) pour créer des modèles 3D et des dessins techniques, ainsi que des calculs pour déterminer les propriétés mécaniques de la pièce.

Il est important de noter que la rétroconception peut être un processus complexe et fastidieux, qui nécessite une expertise technique pour garantir une reproduction ou une modification de qualité de la pièce originale.

La rétro conception se déroule en 3 phases :

I.5.1. Phase 1 : L'acquisition des données numériques 3D :

Cette phase de numérisation consiste à acquérir des points 3D en digitalisant la surface de la pièce en question. Cette opération génère un nuage de points. Ces mesures sont tridimensionnelles (en 3D) et peuvent être réalisées sur tout type de pièce, de la petite pièce à la grande pièce.

Durant cette phase de digitalisation, différentes technologies de numérisation peuvent être utilisées : numérisation avec contact (palpage) ou numérisation sans contact (triangulation par laser, optique sans laser et photogrammétrie, imagerie médical...).

I.5.2. Phase 2 : Triangulation

A. Traitement et alignement des données obtenues

- Alignement
- Réduction de points bruits (réduction recovery)
- Lissage des points (smoothing)

B. Modélisation polygonale

- Création du maillage polygonale (conversion du nuage de points en modèle polygonal)
- Réparation du modèle par édition polygonale

I.5.3. Phase 3 : Rétro-conception

La dernière étape de la rétro conception consiste à générer sur le modèle polygonal un réseau de courbes géométriques afin de reconstruire les surfaces épousant la pièce numérisée (Figure I.2).

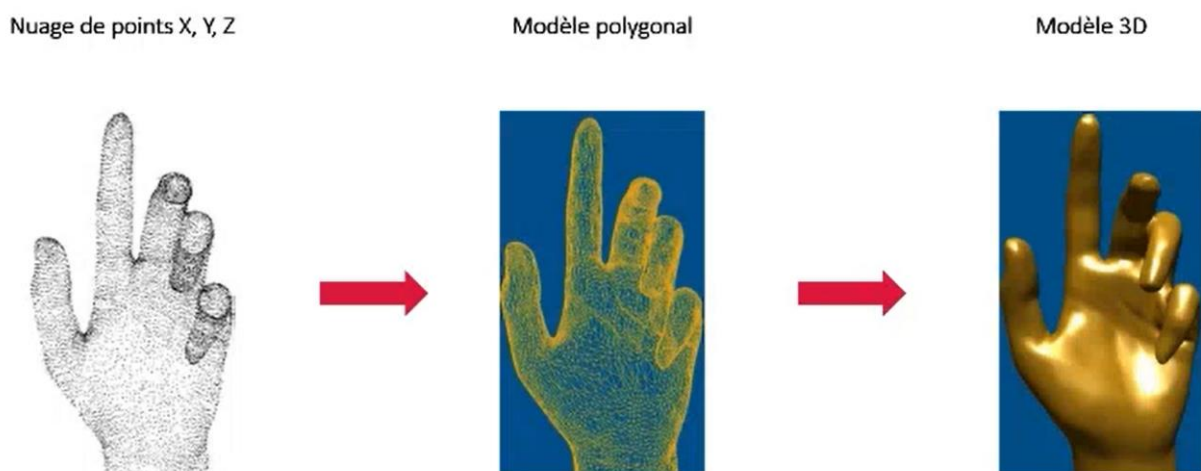


Figure I.2 : Principe numérisation 3D

I.6. Cycle de développement d'un produit

I.6.1. Cycle de développement d'un produit en général

Le cycle de développement d'une pièce mécanique est un processus de planification, de conception, de fabrication et de test visant à produire une pièce qui répond aux exigences fonctionnelles et qualitatives requises. Il s'agit d'un processus itératif qui peut comporter plusieurs étapes telles que la définition des spécifications, l'analyse de différentes options de conception, la modélisation 3D, la simulation, la production, les tests et l'amélioration. Le but final est de produire une pièce fiable, efficace et conforme aux standards de qualité. En utilisant un cycle de développement rigoureux, les entreprises peuvent s'assurer que leurs produits répondent aux attentes de leurs clients tout en réduisant les coûts et les délais de production.

Le cycle de développement d'un produit comporte généralement les étapes suivantes :

- Conception : définition des spécifications et des exigences de la pièce.
- Analyse : étude des différentes options de conception pour déterminer la meilleure solution.
- Modélisation 3D : création d'un modèle 3D de la pièce en utilisant des logiciels de CAO (conception assistée par ordinateur).
- Simulation : vérification du modèle à l'aide de simulations pour s'assurer qu'il remplit les spécifications.
- Fabrication : production de la pièce en utilisant les moyens de production les plus adaptés (tournage, fraisage, etc.).
- Tests : essais de la pièce pour vérifier si elle remplit les spécifications et pour identifier les éventuels problèmes.
- Amélioration : modification de la conception pour corriger les défauts identifiés lors des tests.
- Certification : délivrance d'une certification pour la pièce après avoir confirmé que toutes les exigences ont été satisfaites.

Ce cycle peut être répété plusieurs fois jusqu'à ce que la pièce soit considérée comme conforme aux spécifications requises (Figure I.3).

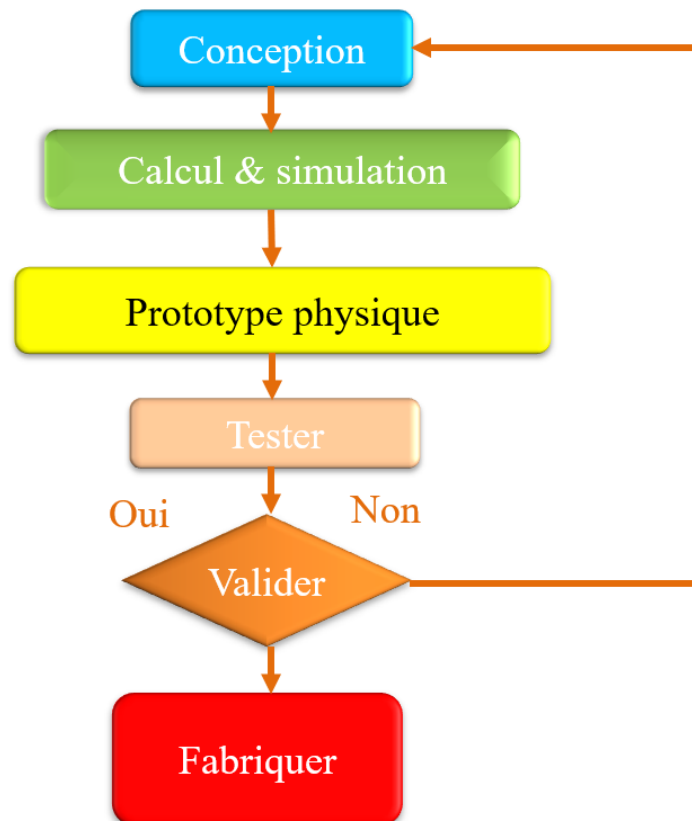


Figure I.3 : Cycle de développement d'un produit

Il est important de noter que le cycle de développement de la rétroconception peut varier en fonction de la complexité du produit et des besoins spécifiques de l'application. Il peut également inclure des étapes supplémentaires comme la certification ou l'homologation pour les produits industriels ou médicaux. Il est également important d'impliquer les parties prenantes dans chaque étape pour assurer que les besoins et les attentes sont pris en compte dans le processus.

I.6.2. Cycle de développement d'un produit par rétroconception

Le cycle de développement par rétroconception est une approche moderne pour développer des produits qui tiennent compte des besoins des utilisateurs, de l'environnement et de l'économie.

Il s'agit d'un processus itératif qui implique la collecte de données sur les utilisateurs, la recherche de tendances, la création de concepts et la réalisation de tests (Figure I.4).

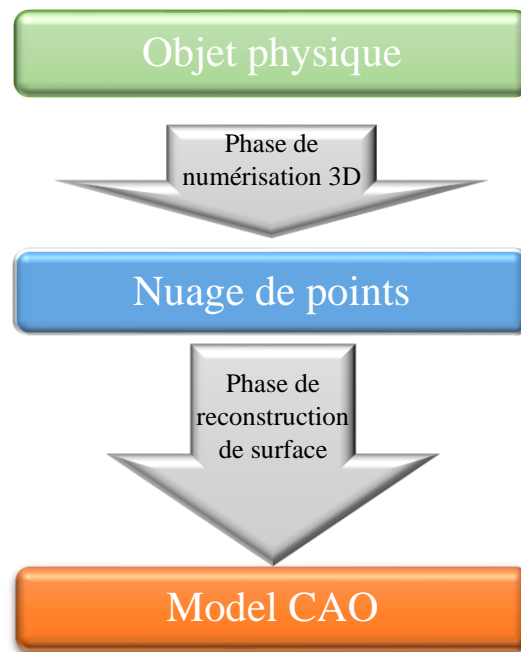


Figure I.4 : Cycle de développement d'un produit par rétroconception

Le cycle de développement d'un produit par rétroconception comprend généralement les étapes suivantes :

- Analyse de besoin : Cette étape consiste à identifier les besoins et les attentes des utilisateurs et des parties prenantes concernant le produit à rétro concevoir.
- Étude de faisabilité : Cette étape consiste à évaluer la faisabilité technique et économique de la rétroconception, en prenant en compte les coûts, les délais et les risques.
- Analyse du produit existant : Cette étape consiste à recueillir des données précises sur le produit existant, en utilisant des techniques telles que la numérisation 3D, la mesure dimensionnelle, l'analyse de contrainte et la simulation de l'usure.
- Définition des spécifications : Cette étape consiste à utiliser les données recueillies pour définir les spécifications techniques et les dessins pour la reproduction ou la modification du produit.
- Conception : Cette étape consiste à utiliser des logiciels de CAO (Conception assistée par ordinateur) pour créer des modèles 3D et des dessins techniques, ainsi que des calculs pour déterminer les propriétés mécaniques de la pièce.
- Validation : Cette étape consiste à valider les spécifications et les dessins en comparant les propriétés du produit rétroconçu aux propriétés du produit original.
- Mise en production : Cette étape consiste à produire le produit rétroconçu en utilisant les dessins et les spécifications validés.
- Suivi et maintenance : Cette étape consiste à surveiller l'utilisation et les performances du produit rétroconçu et à apporter des améliorations ou des modifications si nécessaire.

I.6.3. La rétro-conception conventionnelle

Nous utilisons le terme de « rétro-conception conventionnelle » pour démarquer la rétro-conception classique de notre nouvelle méthodologie globale de rétro-conception.

La rétro-conception conventionnelle est composée de quatre parties distinctes (Figure I.5). [3]

- Digitalisation et acquisition des données géométriques.
- Reconstruction surfacique.
- Segmentation et ajustement des surfaces.
- Création du modèle 3D final.

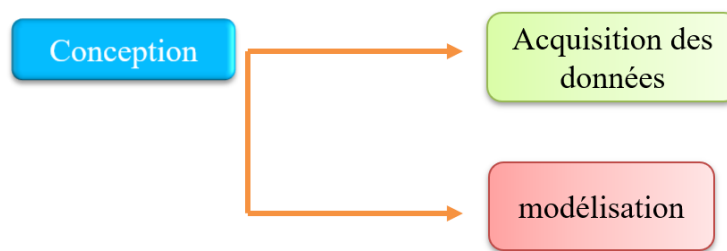


Figure I.5 : Rétro-conception conventionnelle

I.6.3.1. Processus classique d'acquisition des données pour fabriquer :

L'acquisition des données pour la fabrication est un processus crucial dans la production de pièces mécaniques. Il s'agit de collecter les informations nécessaires pour produire une pièce qui répond aux exigences de qualité, de fonctionnalité et de tolérance.

Pour acquisition ces données en utilisent les instruments classiques tels que pied à coulisse, palmaire, comparateur, Trusquin, ... (Figure I.6)



Figure I.6 : Instruments classiques utilisés pour d'acquisition des données

I.6.3.2 Inconvénients du processus classique d'acquisition des données

- Processus totalement manuel
- Pas de sauvegarde des données
- Limitations pour les surfaces complexes
- Plusieurs appareils pour différentes mesures
- Nécessite beaucoup de temps
- Une donnée par opération

I.6.4. Rétro-conception moderne :

La rétro-conception est très présente dans le domaine de la conception mécanique. On trouve plusieurs solutions qui ont été développées dans ce domaine, cependant, ces solutions sont le plus souvent très contextualisées, partielles et incomplètes. [4][5]

De manière générale dans la littérature, 4 actions principales transparaissent dans l'analyse de méthode des processus de rétro-conception :

- Scan du produit et acquisition des données
- Segmentation des données acquises durant le scan
- Extraction de connaissances (i.e., reconnaissance d'entités de fabrication)
- Connaissances géométriques dans la majeure partie des cas.
- Reconstruction du modèle 3D mis à jour

Il est à signaler que l'aspect connaissance est restreint aux seules formes topologiques et géométriques, et de ce fait, ces méthodes de rétro-conception restreignent le champ d'action du concepteur, alors qu'une intégration de connaissances d'autres types [6] aurait apporté une richesse sémantique et qui nous permettrait d'avoir plus de liberté dans le processus.

I.6.4.1. Processus moderne d'acquisition des données :

Les processus moderne d'acquisition des données pour la rétroconception est très utile pour les entreprises qui cherchent à développer de nouveaux produits plus rapidement et à moindre coût tout en améliorant la qualité de leurs produits existants. Les outils numériques permettent aux entreprises de collecter, stocker, analyser et utiliser les données sur les produits existants pour développer de nouveaux produits plus rapidement et avec une meilleure précision.

Plusieurs appareils sont utilisés : scanner 3D, MMT, photogrammétrie, laser radas, tomographe (Figure I.7).



Figure I.7: Appareils modernes utilisés pour l'acquisition des données

I.6.4.2. Avantages du processus moderne d'acquisition des données

- Processus semi-auto ou totalement auto
- Données enregistrées et informatisées
- Numérisation des surfaces complexes
- Un seul appareil pour différentes mesures
- Temps réduit
- Millions de données par opération

I.7. Etapes de rétroconception

Les étapes de la rétroconception varient en fonction de l'application et de la complexité du produit, mais en général, elles incluent les étapes suivantes :

1. Étude de faisabilité: Cette étape consiste à évaluer la faisabilité technique et économique de la rétroconception, en prenant en compte les coûts, les délais et les risques.
2. Analyse du produit existant: Cette étape consiste à recueillir des données précises sur le produit existant, en utilisant des techniques telles que la numérisation 3D, la mesure dimensionnelle, l'analyse de contrainte et la simulation de l'usure.

3. Définition des spécifications: Cette étape consiste à utiliser les données recueillies pour définir les spécifications techniques et les dessins pour la reproduction ou la modification du produit.
4. Conception: Cette étape consiste à utiliser des logiciels de CAO (Conception assistée par ordinateur) pour créer des modèles 3D et des dessins techniques, ainsi que des calculs pour déterminer les propriétés mécaniques de la pièce.
5. Validation: Cette étape consiste à valider les spécifications et les dessins en comparant les propriétés du produit rétroconçu aux propriétés du produit original.
6. Mise en production: Cette étape consiste à produire le produit rétroconçu en utilisant les dessins et les spécifications validés.

Il est important de noter que la rétroconception peut être un processus itératif, avec des retours en arrière pour des ajustements et des améliorations en cours de route. Il est également important d'impliquer les parties prenantes dans chaque étape pour assurer que les besoins et les attentes sont pris en compte dans le processus.

I.8.Nuages de points :

Les nuages de points 3D (Figure I.8) fournissent une base pour une modélisation rapide dans l'automatisation industrielle, l'architecture, l'agriculture, la construction ou l'entretien de tunnels et de mines, la gestion des installations et la planification urbaine et régionale. [7]

Ces dernières années, les nuages de points 3D ont connu une grande popularité pour représenter des objets 3D statiques et dynamiques.

Aujourd'hui, les nuages de points 3D offrent des représentations très réalistes d'une grande variété d'objets et de scènes 3D. Ils sont capables de représenter des objets à différentes échelles aussi petits qu'un vaisseau sanguin ou aussi gros qu'une voiture, un point de repère ou même une ville entière. [8]

Par définition, un nuage de points 3D est un ensemble de points $\{P_i\}$, $i=1 :n$, intégrés dans l'espace 3D et portant à la fois des informations de géométrie et d'attributs (c'est-à-dire des propriétés photométriques). Le terme "nuage" reflète la nature non organisée de l'ensemble. [9]

Les nuages de points peuvent être à la fois statiques et dynamiques. Dans le cas d'un contenu dynamique, un nuage de points différent est considéré à chaque image, représentant la variation continue d'un nuage de points. Soulignons que le nombre de points peut varier d'une trame à l'autre et qu'il n'y a pas de correspondance point à point disponible entre nuages dans des trames successives. De plus, les informations de géométrie font référence à la position du point dans un système de coordonnées cartésien donné, exprimé en coordonnées (X,Y,Z).

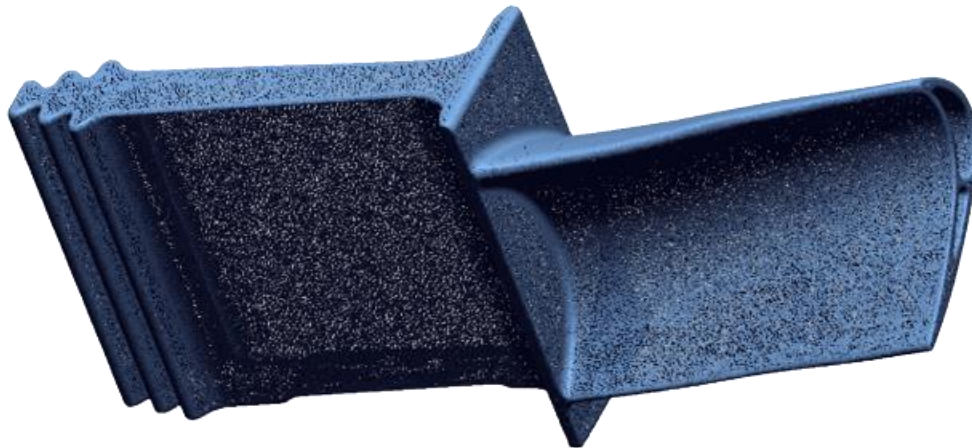


Figure I.8: Nuages des points

Les informations d'attribut décrivent l'apparence visuelle de chaque point et peuvent prendre différentes formes, selon les cas d'utilisation considérés. Les attributs les plus couramment utilisés sont les valeurs de couleur (R,G, B) et les vecteurs normaux (n_x , n_y , n_z).

De plus, les informations de réflectance peuvent également être prises en compte. [8]

En revanche, la rétro-ingénierie crée une implémentation différente avec la même fonctionnalité.

La phase de traitement des points consiste à importer les données du nuage de points bruts, à réduire le bruit et à réduire le nombre de points à l'aide d'algorithmes de filtrage. Les données du nuage de points peuvent être fusionnées dans les cas où la partie entière est capturée dans plusieurs balayages. Différents fournisseurs de logiciels ont différentes solutions pour fusionner les fichiers.

La phase d'élaboration du modèle géométrique propre à l'application est l'activité la plus complexe dans les RE. [10] La raison principale est le besoin d'algorithmes avancés d'ajustement de surface pour générer des surfaces précises. Étant donné que la plupart des logiciels de CAO ne sont pas conçus pour la grande quantité de données dans les nuages de points, un logiciel séparé est nécessaire pour le processus complexe et lourdement étudié de transformation des nuages de points en surfaces pouvant être utilisées dans les logiciels de CAO.[11]

CHAPITRE II

Principales technologies de numérisation 3D

II.1. Introduction :

Les technologies de numérisation 3D permettent de capturer la forme et les détails de la géométrie d'un objet ou d'une scène en trois dimensions. Elles peuvent être utilisées pour numériser des objets réels pour les visualiser, les archiver, les restaurer, les animer, les mesurer, les inspecter, les simuler et les fabriquer. Les technologies de numérisation 3D incluent :

La photogrammétrie : consiste à prendre des photos d'un objet ou d'une scène sous différents angles, puis à utiliser un logiciel pour reconstruire un modèle 3D en utilisant les données de mouvement et de perspective.

Le laser scanning : utilise un laser pour mesurer les distances et les points d'un objet ou d'une scène, puis utilise un logiciel pour reconstruire un modèle 3D.

La numérisation par profondeur : utilise une caméra et un projecteur pour mesurer la distance à chaque point d'un objet ou d'une scène, puis utilise un logiciel pour reconstruire un modèle 3D.

La numérisation par projection de lumière : utilise une source de lumière pour projeter des motifs sur un objet ou une scène, puis utilise une caméra pour capturer les images de ces motifs, puis utilise un logiciel pour reconstruire un modèle 3D.

La numérisation tactile : utilise un stylo ou un autre outil pour numériser manuellement les détails d'un objet ou d'une scène, puis utilise un logiciel pour reconstruire un modèle 3D.

Chaque technologie de numérisation 3D a ses propres avantages et inconvénients, et le choix dépendra des exigences et des objectifs de chaque projet.

II.2. Les scanners 3D :

Le scanner 3D connaît un essor fulgurant ces dernières années. C'est un moyen rapide et efficace pour un grand nombre d'entrepreneurs de passer à la numérisation, contrôle qualité, inspection visuelle, mesurage précis de dimensions, prototypage et calcul de volumes. Le scanner 3D apporte beaucoup d'avantages au milieu industriel, à la rétro-ingénierie ou encore aux jeux vidéo. Mais pas seulement ! Depuis quelques années, cette technologie tend à se démocratiser et à intéresser de nombreux secteurs d'activité

Le scanner 3D et, de façon plus globale, la numérisation sont des leviers importants que les entreprises doivent mettre en place pour innover plus efficacement actuellement. Presque tous les domaines sont concernés : la rétro-ingénierie, l'audiovisuel, l'architecture, le génie civil, le patrimoine culturel, l'archéologie, le médical, la joaillerie, la construction, l'art et le design, ... mais aussi le particulier qui veut créer et fabriquer autrement.

II.3. Les avantages de numérisation :

Le scanner 3D est une technologie qui permet de numériser des objets ou des environnements en trois dimensions. Voici quelques-uns des avantages que cette technologie peut offrir :

- Précision : Les scanners 3D permettent de capturer des données très précises sur les dimensions et la forme des objets numérisés.

- Rapidité : Les scanners 3D peuvent numériser des objets très rapidement, en quelques minutes seulement.
- Facilité d'utilisation : Les scanners 3D sont de plus en plus simples à utiliser, avec des interfaces conviviales qui permettent à un grand nombre de personnes de les utiliser facilement.
- Possibilité de modifier facilement : Une fois qu'un objet a été numérisé en 3D, il peut être modifié ou adapté très facilement grâce à des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO).
- Visualisation : Les scanners 3D permettent de visualiser des objets sous tous les angles, en créant des modèles numériques qui peuvent être tournés et manipulés à l'écran.
- Réduction des coûts : Les scanners 3D peuvent réduire les coûts de fabrication et de prototypage, en permettant de concevoir des pièces plus rapidement et plus précisément.
- Utilisation dans divers domaines : Les scanners 3D sont utilisés dans de nombreux domaines, comme la conception industrielle, l'architecture, la médecine, l'art, l'archéologie, etc.

II.4. Les limites de la numérisation dans la construction :

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

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

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

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

II.5. Numérisation tridimensionnelle :

Un scanner tridimensionnel est un appareil permettant de numériser la forme et éventuellement l'apparence d'un objet.

Plusieurs techniques sont utilisées pour la numérisation tridimensionnelle, chacune à ses limites, avantages et coûts. Certains types d'objets restent toutefois encore difficiles à numériser: par exemple les appareils utilisant des technologies optiques rencontrent beaucoup de difficultés avec des objets brillants, miroitants ou transparents. Il existe cependant des méthodes permettant de scanner les objets brillants, par exemple en les recouvrant d'une fine couche de poudre blanche qui permettra à plus de photon de se réfléchir et de parvenir à l'optique du scanner.

Un scanner 3D mesure généralement le positionnement d'un échantillonnage de points dans un système de coordonnées (un nuage de points) de la surface d'un sujet pour ensuite en extrapoler la forme à partir de leur répartition : ce procédé est appelé une reconstruction 3D.

La précision et la performance d'un scanner 3D est donc mesurée par le nombre de points que l'on obtient de l'image après cet échantillonnage car plus on aura de points plus la reconstitution sera fidèle et précise.

Cependant pour cette précision il y a un prix à payer : la puissance de la machine de traitement. Oui, car plus le nombre de points à traiter sera élevé, plus le logiciel de reconstruction 3D nécessitera l'utilisation de ressources physiques considérables notamment en termes de mémoire et processeur graphique. [12]

La précision globale du système d'acquisition est liée à la précision du capteur, ainsi qu'à la précision du dispositif sur lequel il est monté. La nuance qui existe entre la rapidité de mesure et la rapidité d'acquisition provient du temps nécessaire au traitement des informations, en particulier dans le cas d'une acquisition en plusieurs prises. [13]

Par ailleurs, certains objets restent assez complexes à scanner avec ce type de méthode, car ils sont **illisibles** par le scanner (Figure II-1). Il existe une solution, c'est de mettre une **couche de craie en spray** pour rendre possible le scan.

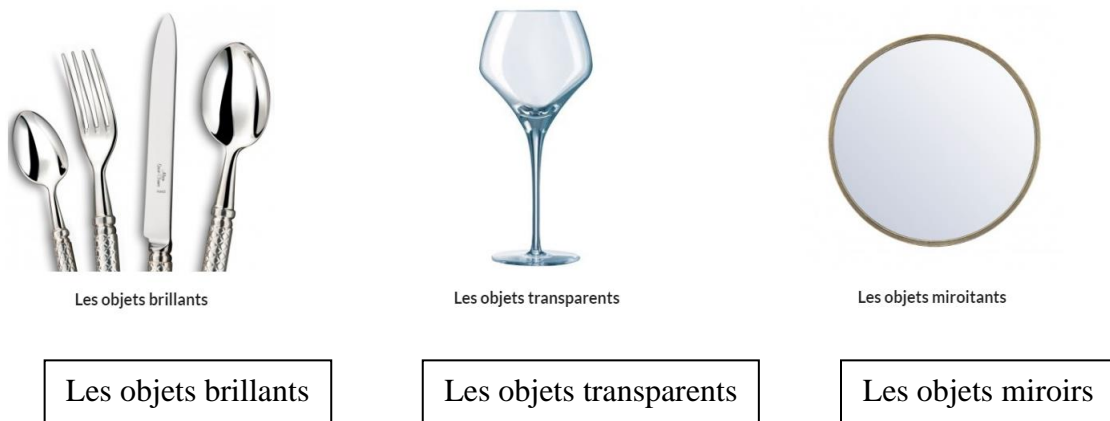


Figure II-1 : les objets assez complexes à scanner

On distingue deux grandes familles dans les procédés de numérisation (Figure II-2).

a. Avec contact :

Le capteur est un palpeur mécanique généralement monté sur une machine à mesurer tridimensionnelle ou un bras articulé. La précision de ce type d'outils peut aller jusqu'au micromètre toutefois les temps de prise de mesure peuvent être relativement longs (1,5 point par seconde pour les palpeurs point par point). Il est à noter que la mise en contact du capteur avec l'objet peut détériorer l'état de surface de l'objet.

b. Sans contact :

Le capteur n'est jamais en contact avec l'objet à mesurer. Diverses technologies sont disponibles sur le marché : point laser, plan laser, photogrammétrie, Le principal avantage de ces technologies réside dans le temps de prise de mesure (jusqu'à 430000 points par seconde), mais au détriment de la précision (de l'ordre du centième de millimètre). [12]

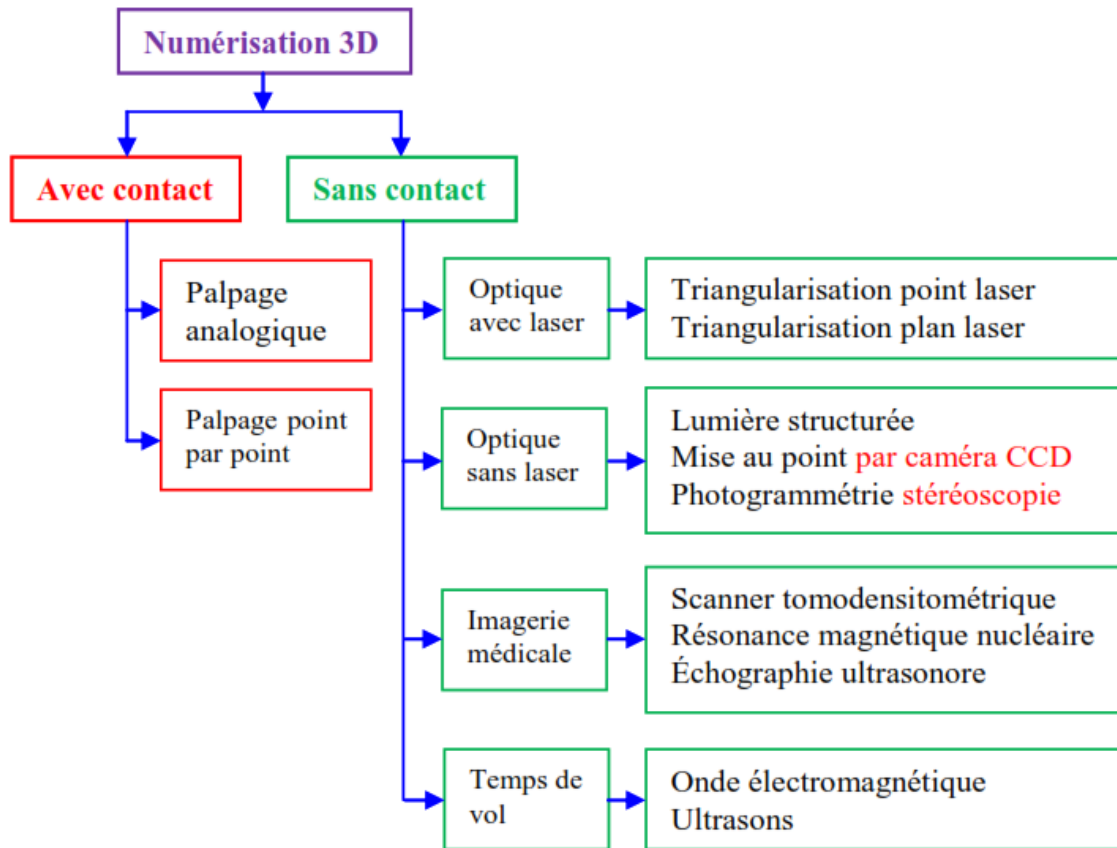


Figure II-2 : Différentes technologie de numérisation [12]

II.5.1. Principe général de fonctionnement d'un scanner 3D :

A partir d'une position donnée par rapport à l'objet à numériser (Figure II-3), l'appareil projette un rayonnement sur une section de la surface de l'objet. Chaque point de la surface touchée par source lumineuse est capté par une caméra intégrée au numériseur et les coordonnées X, Y, Z ainsi que l'intensité de chacun de ces points sont enregistrées dans la mémoire de l'ordinateur qui contrôle le scanner. Cette opération est répétée des millions de fois à la seconde, ce qui génère un fichier très dense de points X, Y, Z de la surface à numériser, appelé nuage de points.

Ce fichier est affiché à l'écran de l'ordinateur et montre la forme tridimensionnelle de la surface numérisée.

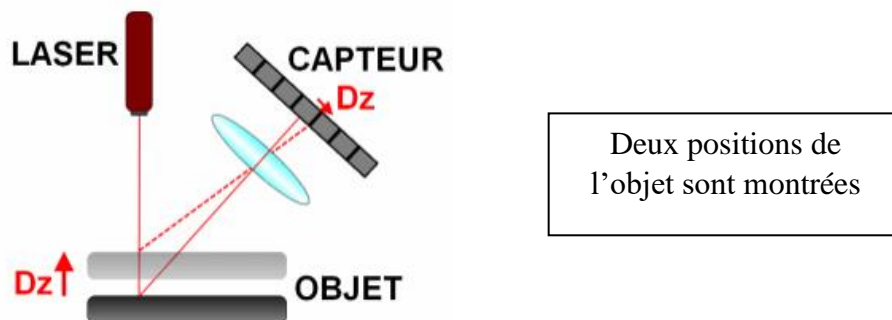


Figure II-3 : principe d'un détecteur utilisant la triangulation laser [14]

L'opération de numériser une section de la surface de l'objet est répétée à partir de points d'observation différents de celui-ci, et cela, autant de fois qu'il est nécessaire pour en couvrir toute la surface, en prenant soin d'avoir une zone commune pour chaque image 3D. Ces images 3D individuelles ainsi captées sont par la suite fusionnées, à l'aide d'un logiciel qui utilise les zones communes de chacune d'elles, pour assembler de façon très précise le modèle numérique 3D. Le logiciel permet aussi d'éliminer les points redondants dans les zones communes de façon à obtenir une couche de points 3D de densité homogène sur toute la surface de l'objet.

Les scanners scannent la totalité de la surface du modèle grâce à un mécanisme qui permet de faire tourner le modèle dans les trois sens de l'espace. La qualité de la reconstruction 3D dépend de la distance existante entre chaque point scanné, c'est ce qu'on appelle la résolution.

II.5.2. Technique de numérisation par contacts

II.5.2.1. Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT)

Une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) est principalement utilisée pour inspecter les pièces. La machine peut être contrôlée manuellement ou via un contrôle hors ligne via des logiciels et des ordinateurs. Les mesures sont définies en fixant une sonde à la machine (Figure II-4). La sonde a généralement une petite bille à l'extrémité d'un arbre d'un diamètre connu. La CMM est alors programmée pour entrer en contact avec la pièce. Lorsque la machine détecte le contact de la pointe de la sonde, une valeur de mesure est prise dans l'espace XYZ.



Figure II-4: Numérisation 3D par machine à mesurer tridimensionnelles (MMT)

Le type le plus courant de MMT est un type de pont qui a 3 axes X, Y et Z. Le système de palpation qui est attaché plusieurs fois peut tourner en fournissant 3 axes supplémentaires pour un total de 6 degrés de liberté (DOF). Pour mesurer très précisément des pièces à quelques microns près, les MMT sont généralement déployées dans une salle d'inspection très contrôlée qui comprend un sol renforcé, une humidité et une température contrôlées, et isolation des vibrations et autres forces qui pourraient affecter la précision. De plus, la plupart des MMT ont une grande surface de table en granit parfaitement plane. Les pièces sont fixées sur la table en granit afin qu'il n'y ait aucun mouvement pendant le processus de mesure.

II.5.2.2. Bras poly articulé :

Les bras poly articulés (Figure II-5) sont utilisés pour des applications très variées : contrôle de pièces industrielles, numérisation d'objets archéologiques etc. Il s'agit de bras mécaniques à six ou sept axes équipés de codeurs permettant de remonter à la position du capteur dans l'espace. Ces bras ont une grande ergonomie, sont assez simple d'utilisation et sont transportables (à la déférence des MMT). Leur portée varie de un à cinq mètres.

La précision est de l'ordre de quelques centaines voire dizaines de microns. Ils sont utilisés avec un palpeur ou une tête laser ligne, ce qui permet de réaliser simultanément l'acquisition complète de la forme et la prise de référence (plans, cylindres . . .). Lors du palpé, l'opérateur vient positionner la bille du palpeur sur la surface de l'objet et déclenche manuellement la prise de mesure. Ces systèmes sont de plus en plus couramment utilisés de nos jours. La précision reste toutefois inférieure à celle d'une MMT. [15]



Figure II-5 : Exemple d'un système combinant un palpeur et une tête laser ligne sur bras Polyarticulé

II.5.3. Technique de numérisation sans contact

II.5.3.1. Technologie de scan 3D photogrammétrie (photographie)

Le mot photogrammétrie vient du grec « **photos** » (lumière), « **gramma** » (quelque chose d'écrit ou de dessiné) et « **métron** » (mesure). [16]

	Photo	gram	métrie
<i>Grec</i>	<i>(photos)</i>	<i>(gramma)</i>	<i>(métron)</i>
	Lumière	Écriture	Mesure

La photogrammétrie, appelée aussi stéréophotogrammétrie, est une technologie basée sur la géométrie projective. Elle permet la numérisation des objets de grandes tailles comme des bâtiments, des derricks et des entrepôts.

Le principe de la photogrammétrie est de prendre des images multiples de l'objet et de localiser manuellement ou automatiquement des points communs à chaque photographie. Les points permettent une mesure 3D de l'objet par une triangulation optique.

Les systèmes photogrammétriques (Figure II-6) sont capables de modéliser des environnements géométriques dans lesquels les objets étudiés comportent des primitives géométriques simples et elle est moins performante pour la numérisation 3D d'une surface courbe. [17]. Présente un état de l'art sur la photogrammétrie. Cette approche permet de retrouver avec précision la taille et la forme des objets géométriques mais elle reste une approche coûteuse puisque le système est multi caméras. [18]



Figure II-6 : La photogrammétrie (les appareils photos et les drones). [19]

II.5.3.1.1. Principe de la photogrammétrie

La photogrammétrie (Figure II-7) est une technique qui consiste à effectuer des mesures dans une scène, en utilisant la parallaxe obtenue entre des images acquises selon des points de vue différents. Recopiant la vision stéréoscopique humaine, elle a longtemps exploité celle-ci pour reconstituer le relief de la scène à partir de cette différence de points de vue.

Actuellement, elle exploite de plus en plus les calculs de corrélation entre des images désormais numériques. [19]

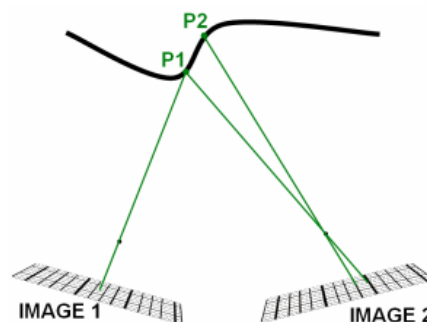


Figure II-7 : Schéma de principe de la photogrammétrie. [14]

II.5.3.1.2. La triangulation

Posséder des images superposables est essentiel à la photogrammétrie. En identifiant les mêmes points sur une multitude d'images et en tenant compte de paramètres tels que la position et l'orientation de l'appareil photo pour chaque cliché, sa distance focale, la distorsion optique, et d'autres variables, il est possible de déterminer où ces points se situent dans l'espace 3D. C'est la triangulation.

La triangulation identifie les points communs sur des photos se superposant et détermine leurs positions dans l'espace 3D par rapport aux positions connues de l'appareil photo (Figure II-8).

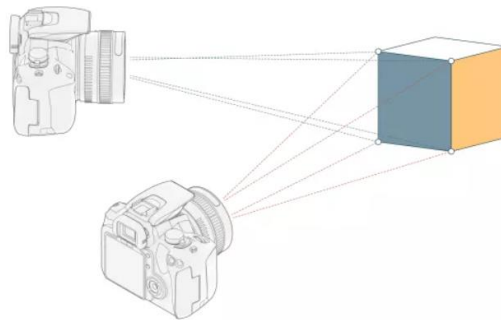


Figure II-8 : Identification des points par triangulation

Les avantages principaux de la technologie par triangulation laser pour le scan 3D sont sa résolution et sa précision.

Les inconvénients sont l'extrême sensibilité du laser aux propriétés physiques de la surface devant être scannée en 3D. Les surfaces très brillantes ou transparentes sont particulièrement problématiques.

II.5.3.1.3. Photogrammétrie métrique sans équipement spécialisé :

Si le but est d'effectuer des mesures précises et que les informations sur la couleur ne sont pas une priorité, nous ne devons utiliser la photogrammétrie que si nous possédons un bon kit de photogrammétrie (Figure II-9) spécialement conçu pour les applications liées aux mesures – tels les systèmes de photogrammétrie haut de gamme de Hexagon. Ceux-ci sont fournis avec un appareil photo numérique, un jeu de cibles, et un ensemble de barres d'échelle graduées précises qui garantiront que vous êtes parfaitement équipé pour votre tâche.



Figure II-9 : Kit de photogrammétrie complet spécialement conçu pour les applications liées aux mesures.



Figure II-10 : Les barres d'échelle (cibles)

II.5.3.1.4. La photogrammétrie pour l'ingénierie :

Pour créer un modèle d'un objet à des fins de contrôle qualité, de rétro-ingénierie, ou quoi que ce soit d'autre, nous n'avons pas forcément besoin de chaque pixel dans l'image. Pour tracer une droite, par exemple, il vous suffit de connaître les positions de deux points.

C'est là le concept derrière ce qui est parfois appelé la photogrammétrie métrique (Figure II-11). Dans cette branche de la photogrammétrie, l'accent est mis sur la précision. L'objectif est d'obtenir des mesures et des calculs exacts à partir de photographies en déterminant, le plus précisément possible, les emplacements relatifs de certains points pertinents sur les images.

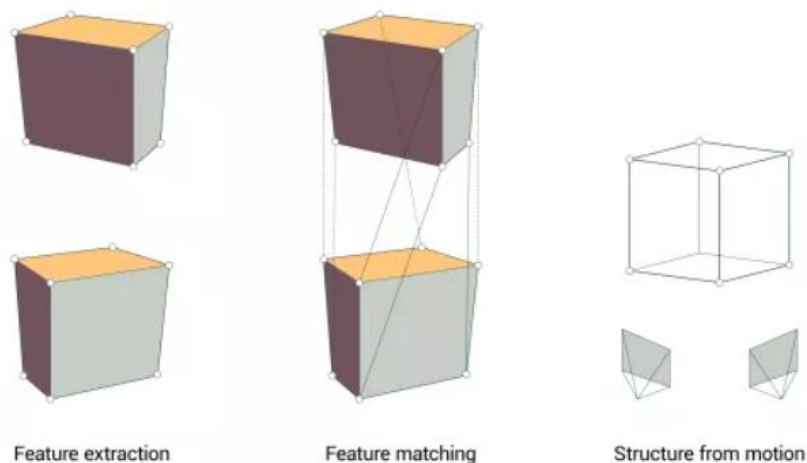


Figure II-11 : La photogrammétrie métrique

Les ingénieurs placent par conséquent des cibles reconnaissables (Figure II-12) par l'algorithme dans les zones d'intérêt. L'algorithme utilise ces cibles pour construire un modèle. Le résultat est une sorte de squelette de points pertinents, et non un nuage de points dense de toutes les surfaces.

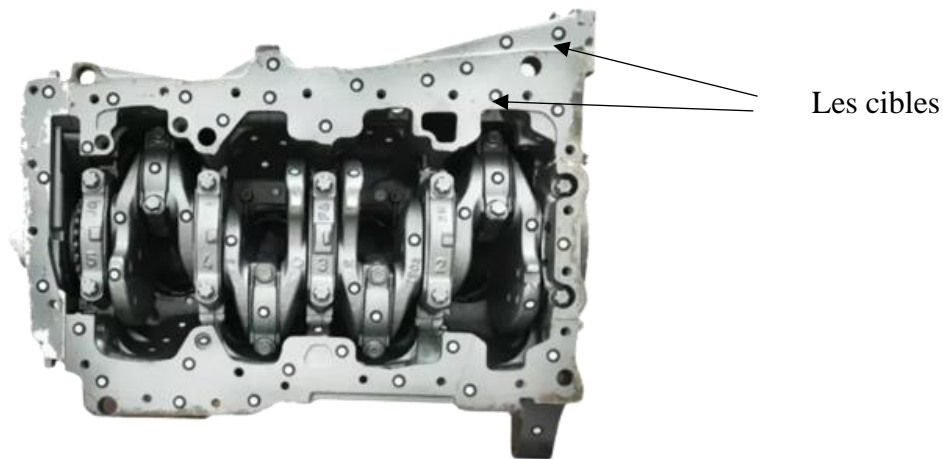


Figure II-12 : Des cibles sont collées sur l'objet pour faciliter l'identification et l'alignement des zones superposables parmi les images.

II.5.3.2. Technologie de scan 3D triangulation laser :

Les scanners 3D (Figure II-13) basés sur la technologie de triangulation laser utilisent la projection d'un rayon laser ou d'un faisceau laser. Le laser est d'abord projeté par le scanner 3D. Lorsque le laser est reflété par l'objet en train d'être numérisé en 3D, sa trajectoire est modifiée en fonction de sa surface.

Un capteur enregistre alors la déviation de trajectoire du laser et la distance qui sépare le scanner 3D de la surface de l'objet. En échantillonnant suffisamment de points de la surface le scanner 3D est capable d'en déduire précisément la surface scannée en 3D.



Figure II-13:scanners triangulation laser

II.5.3.2.1. Triangulation :

Le troisième type de scanners à base de laser fonctionne sur le principe de la triangulation, où la lumière laser est émise et renvoyée à un emplacement spécifique sur un réseau de capteurs d'image d'une caméra embarquée. Pour calculer la distance entre l'objet et le scanner 3D, le système utilise la triangulation trigonométrique car la source laser, le capteur et la cible laissée sur l'objet forment un triangle (Figure II-14). La distance entre la source laser et le capteur est connue très précisément, de même que l'angle entre le laser et le capteur. Lorsque

la lumière laser rebondit sur l'objet scanné, le système peut mesurer l'angle auquel elle revient vers le capteur, et donc la distance entre la source laser et la surface de l'objet.

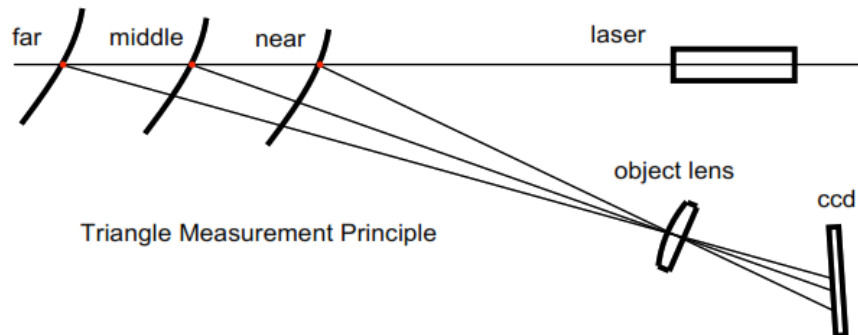


Figure II-14 : Principe de mesure triangulaire

Les scanners laser basés sur la triangulation fonctionnent à des distances beaucoup plus courtes (moins de 5 mètres) que les scanners à temps de vol ou à déphasage en raison de la faible plage dynamique des capteurs d'image et de la diminution de la précision avec la distance. La plupart des systèmes de triangulation sont également livrés avec une option de capture RVB interne.

Généralement, les scanners basés sur la triangulation sont les plus adaptés pour numériser des objets plus petits dont la taille varie de 1 cm à 2-3 mètres, selon le fabricant. En ce qui concerne le facteur de forme, il existe des scanners à triangulation fixes montés sur trépied. Cependant, cette technologie rencontre le plus de succès lorsqu'elle est utilisée dans des scanners 3D portables.

II.5.3.2.2. Fonctionnement du système CMS106 sur une MMT :

Le capteur est monté à l'extrémité du vérin d'une machine verticale ou horizontale, typiquement sur un poignet motorisé, et est déplacé par la machine à une distance appropriée de la surface à mesurer. Fonctionnant par triangulation laser scannée, le CMS106 (Figure II-15) projette un faisceau laser sur l'objet et détecte la réflexion par une caméra CCD à partir de laquelle un seul point mesuré est créé. Grâce à l'utilisation d'un axe de balayage motorisé, le faisceau laser balaie la pièce à usiner en créant une ligne comprenant jusqu'à 2000 points. [20]

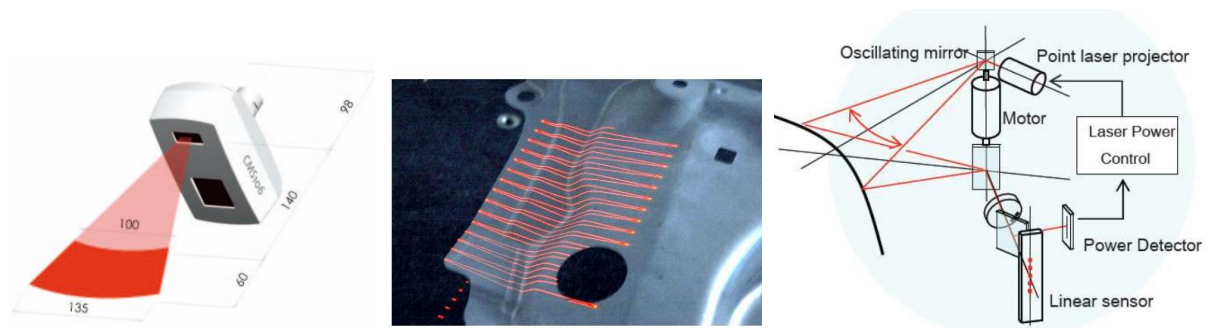


Figure II-15 : Système CMS106 sur MMT. [21]

Afin de relier ces coordonnées au monde de la machine, le contrôleur CMS génère un signal de déclenchement qui verrouille les coordonnées XYZ des axes de la machine, via l'une des deux entrées de déclenchement du contrôleur électronique (XP13). La corrélation entre le

capteur et les coordonnées de la machine a lieu sur l'ordinateur sur lequel logiciel (PC-DMIS) et l'interface CMS sont installés (Figure II-16). Le transfert de données se fait via une connexion Ethernet de l'ordinateur au contrôleur CMS.

Lorsque le capteur traverse la pièce montée sur la MMT, les multiples lignes de balayage forment un nuage de points composé de plusieurs milliers de points de mesure. Le nuage de points peut ensuite être comparé à un modèle CAD pour révéler les écarts par rapport aux valeurs nominales. Logiciel (PC-DMIS) calcule l'emplacement et les dimensions des éléments géométriques ou collecte des nuages de points pour une élaboration hors ligne ou pour l'exportation vers une application logicielle externe. [20]

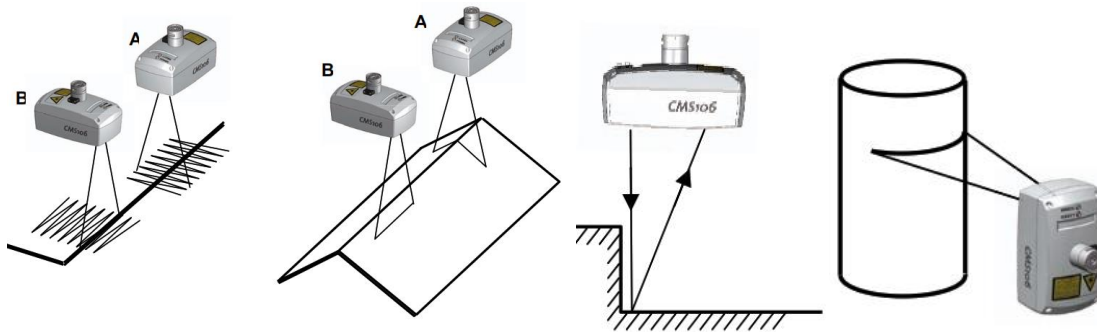


Figure II-16 : Numérisation avec CMS106. [21]

II.5.3.2.3. Rétro-ingénierie :

Des petits composants mécaniques aux objets industriels massifs, les scanners laser sont devenus une technologie essentielle dans l'arsenal des professionnels travaillant dans la conception et le développement de produits. Jadis un processus compliqué qui pouvait nécessiter des jours de désassemblage, des mesures manuelles détaillées, et un examen laborieux de chaque pièce d'un produit, la rétro-ingénierie prend désormais, grâce au scan laser, entre une poignée de minutes pour un modèle de surface CAO à quelques heures pour un modèle 3D paramétrique.

Les scanners servent à créer des schémas numériques précis de pièces abîmées ou déformées, nécessitant un nouveau design mais sans données CAO disponibles. Les scanners laser portables dotés de processeurs intégrés sont parfaits pour examiner des objets de petite et moyenne taille, tandis que les appareils de moyenne et longue portée conviennent le mieux aux objets plus grands. La création instantanée de modèles CAO fait gagner des heures, voire des jours de travail, que les équipes de R&D peuvent consacrer à l'amélioration des produits (Figure II-17).

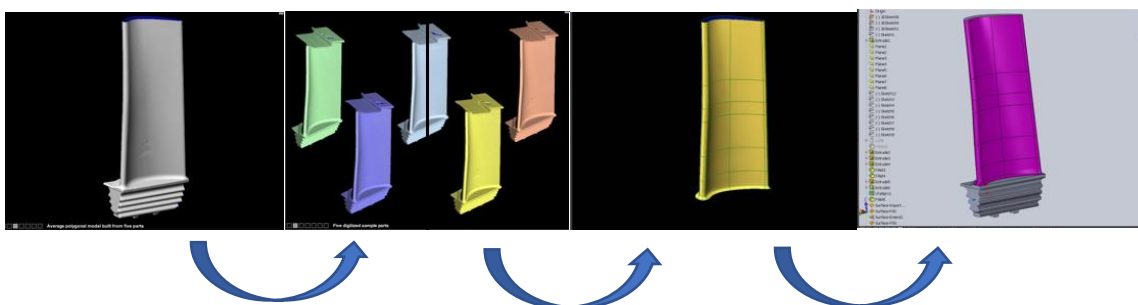


Figure II-17 : Rétroconception des aubes de turbine. [22]

II.5.3.2.4. Contrôle qualité :

Le contrôle qualité est une autre étape importante de la fabrication et un domaine de plus révolutionné par les scanners laser. Traditionnellement dominés par les techniques de mesure manuelle basées sur le contact, les workflows de contrôle qualité peuvent désormais, grâce au scan laser, être réalisés bien plus rapidement, plus précisément, et avec des données bien plus mesurables. Avec pour conséquences : moins de boucles itératives et une livraison plus rapide des produits au client. À la différence des MMT qui peuvent généralement effectuer des dizaines de mesures de points à la fois, doivent être en contact physique avec la surface, et exigent d'être programmées pour chaque nouvelle pièce examinée, les scanners laser peuvent obtenir des millions de mesures pour divers types d'objets aux diverses complexités géométriques beaucoup plus rapidement et sans le moindre contact.

II.5.3.3. Technologie de scan 3D par lumière structurée :

Concrètement, la lumière structurée est un motif précisément calibré de lumière blanche ou bleue qu'un scanner 3D projette sur l'objet que vous êtes en train de scanner. En général, ce motif est constitué d'une série de lignes parallèles, de bandes ou d'une grille.

Lorsque la lumière structurée frappe la surface de l'objet, le motif lumineux est déformé par les courbes, dépressions ou zones en relief qu'il rencontre.

La caméra du scanner capture, un cliché après l'autre, ces motifs lumineux déformés au fur et à mesure qu'ils sont réfléchis, tandis que le logiciel de scan analyse les motifs et les utilise pour reconstruire précisément en 3D numérique toutes les surfaces de l'objet scanné (Figure II.18).

En fonction de la taille de l'objet scanné et de la durée du scan, rien qu'en une seule séance de scan, votre scanner 3D peut capturer des dizaines, des centaines, voire des milliers d'images.



Figure II-18 : les scanners 3D portable

II.5.3.3.1. Transformer la lumière réfléchie en modèles 3D en haute résolution :

Les algorithmes de reconnaissance du motif et de reconstruction du logiciel de scan comprennent que lorsqu'une bande de lumière est plus épaisse ou plus fine à certains endroits, cela signifie que ces points sur la surface sont respectivement plus proches ou plus éloignés de la caméra, alors que d'autres formes et structures sont déterminées par différents types de déformations dans les motifs de lumière structurée.

Certains scanners 3D sont dotés d'une caméra supplémentaire qui enregistre la texture de l'objet. Dans le monde du scan 3D et de la modélisation, la texture se définit comme les couleurs d'un objet et d'autres caractéristiques visibles de sa surface.

Une fois acquises, les images sont transformées en modèle 3D. Si des images de texture ont été acquises lors du scan, elles seront ensuite « mappées » sur le modèle 3D, ouvrant la voie à un modèle 3D final qui peut être presque identique à son modèle réel d'origine et avoir les mêmes dimensions que celui-ci.

Un scanner 3D portable capture chaque côté de l'objet autour duquel il est déplacé en projetant une lumière structurée sur les surfaces de l'objet sous différents angles et depuis différents endroits, collectant d'immenses quantités de détails précis sur la surface (certains scanners acquièrent des millions de points de données de surface par seconde). Un plateau rotatif peut également être utilisé pour faire tourner de petits objets et scanner tous leurs côtés, tout en gardant le scanner portable relativement immobile (Figure II-19).

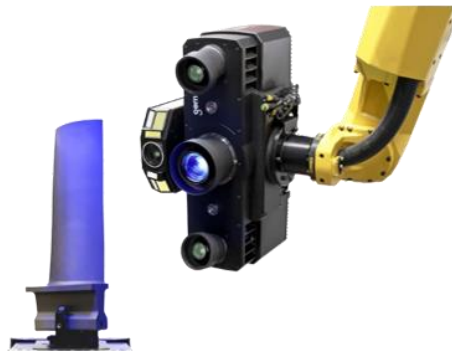


Figure II-19 : Scan 3D robotisée (lumière structurée)

II.5.3.3.2. Systèmes à lumière structurée ou modulée :

Les scanners 3D à lumière structurée projettent un motif lumineux sur le sujet et en observent la déformation. Le motif peut être à une ou deux dimensions (typiquement des lignes ou des carreaux). Il est projeté sur le sujet à l'aide d'un vidéoprojecteur LCD ou laser. Une caméra légèrement décalée du projecteur est utilisée pour enregistrer les déformations et un programme informatique sert à calculer les distances des points composant ce motif (Figure II-20).

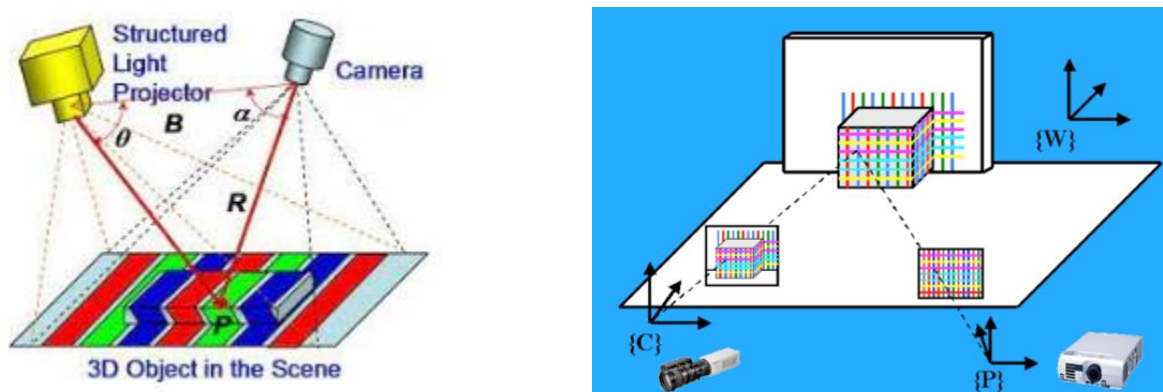


Figure II-20 : Motifs de lumière structurée codés par la couleur

Il existe également des scanners à lumière modulée : la source a un cycle, et une caméra détecte la lumière réfléchie, mesure la variation de l'amplitude et calcule ainsi la distance que la lumière a parcourue. Cette méthode évite les interférences avec d'autres sources de lumière.

II.5.3.4. Technologie de scan tomographie à rayons X :

En mécanique, la tomographie par rayons X est une technique d'imagerie non destructive qui permet d'analyser la structure interne de matériaux solides tels que les composites, les alliages métalliques, les pièces mécaniques, etc. Elle permet d'obtenir des images en 3D de la distribution de la densité et des propriétés des matériaux, à partir desquelles on peut en déduire des informations sur leur qualité, leur intégrité et leur performance.

La tomographie par rayons X en mécanique fonctionne de la même manière que la tomographie médicale, en envoyant des rayons X à travers l'objet à étudier à partir de différents angles, puis en utilisant des capteurs pour mesurer l'intensité des rayons X qui ont traversé l'objet. Ces données sont ensuite traitées par un ordinateur pour produire une image en 3D de la structure interne de l'objet.

La tomographie par rayons X en mécanique est utilisée dans de nombreuses applications telles que l'inspection des pièces mécaniques, la recherche et développement de nouveaux matériaux, l'étude de la dégradation des matériaux au fil du temps, etc (Figure II-21). Elle permet de détecter des défauts internes tels que des fissures, des porosités, des inclusions, des zones de contraintes résiduelles, etc. et donc d'améliorer la qualité et la durabilité des pièces mécaniques.



Figure II-21: tomographie industrielle à rayons x

II.5.3.4.1. Principe de la tomographie :

Comme la radiographie (en deux dimensions), la tomographie est basée sur l'absorption différentielle des rayons X en fonction de la densité de matière mais elle exploite un grand nombre de vues réalisées suivant différents angles par rotation de l'objet et suivant plusieurs positions en hauteur (Figure II-22). Les différentes vues permettent de déterminer l'absorption de chaque élément de volume appelé « voxels » et ainsi de reconstituer l'objet en trois dimensions. Il est alors possible d'obtenir plusieurs représentations du volume de l'objet, dont la visualisation sous forme de coupes virtuelles. Cette représentation est la plus conventionnelle et la plus pratique pour déterminer des taux de porosités ou mesurer des discontinuités. Pour examiner la totalité du volume, il suffit de faire défiler à l'écran les coupes 2D. [23]

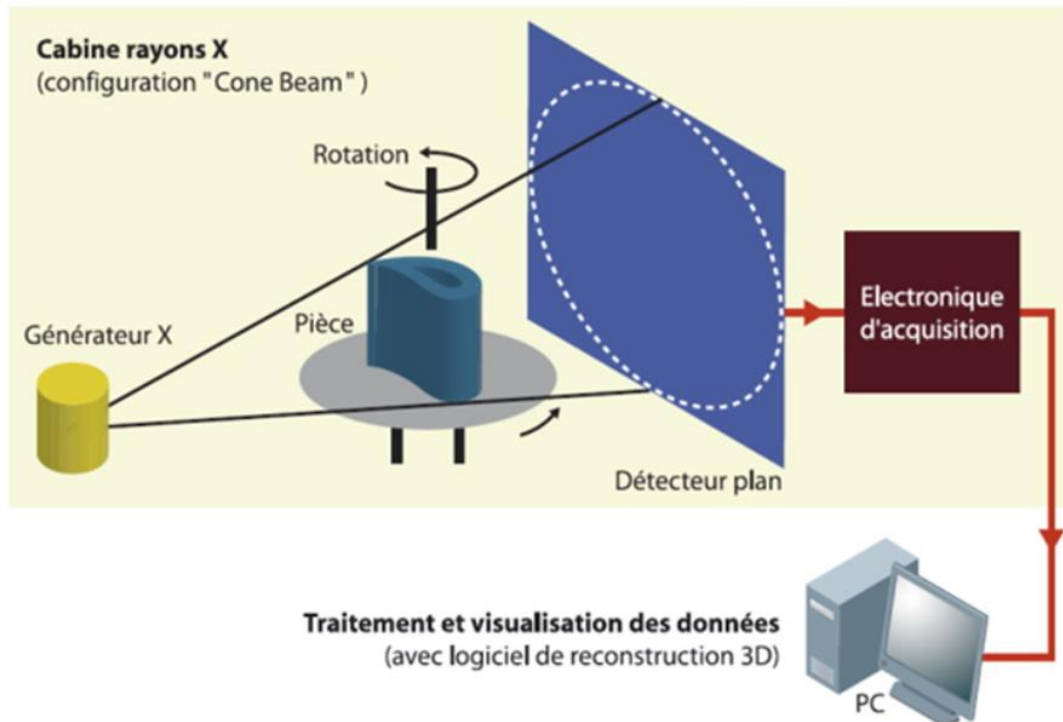


Figure II-22 : Principe de la tomographie

II.5.3.4.2. Les applications industrielles :

L'analyse santé matière consiste en la recherche de défauts, de retassures, de porosités, de criques ou autres anomalies que peuvent comporter les pièces et produits fabriqués. L'analyse santé matière peut mettre en évidence des réseaux de porosités à l'origine de fuites ou encore des criques placées dans les zones mécaniquement contraintes (Figure II-23).

Les données de la tomographie permettent également les contrôles dimensionnels et notamment la mesure de l'épaisseur de paroi, de diamètre, rayon, taille d'anomalie, distance entre deux points ou parois. La tomographie est également un outil de vérification du procédé de fabrication mettant en évidence les dépôts de noyaux, les toiles « trop » fines ou autres anomalies d'assemblage.

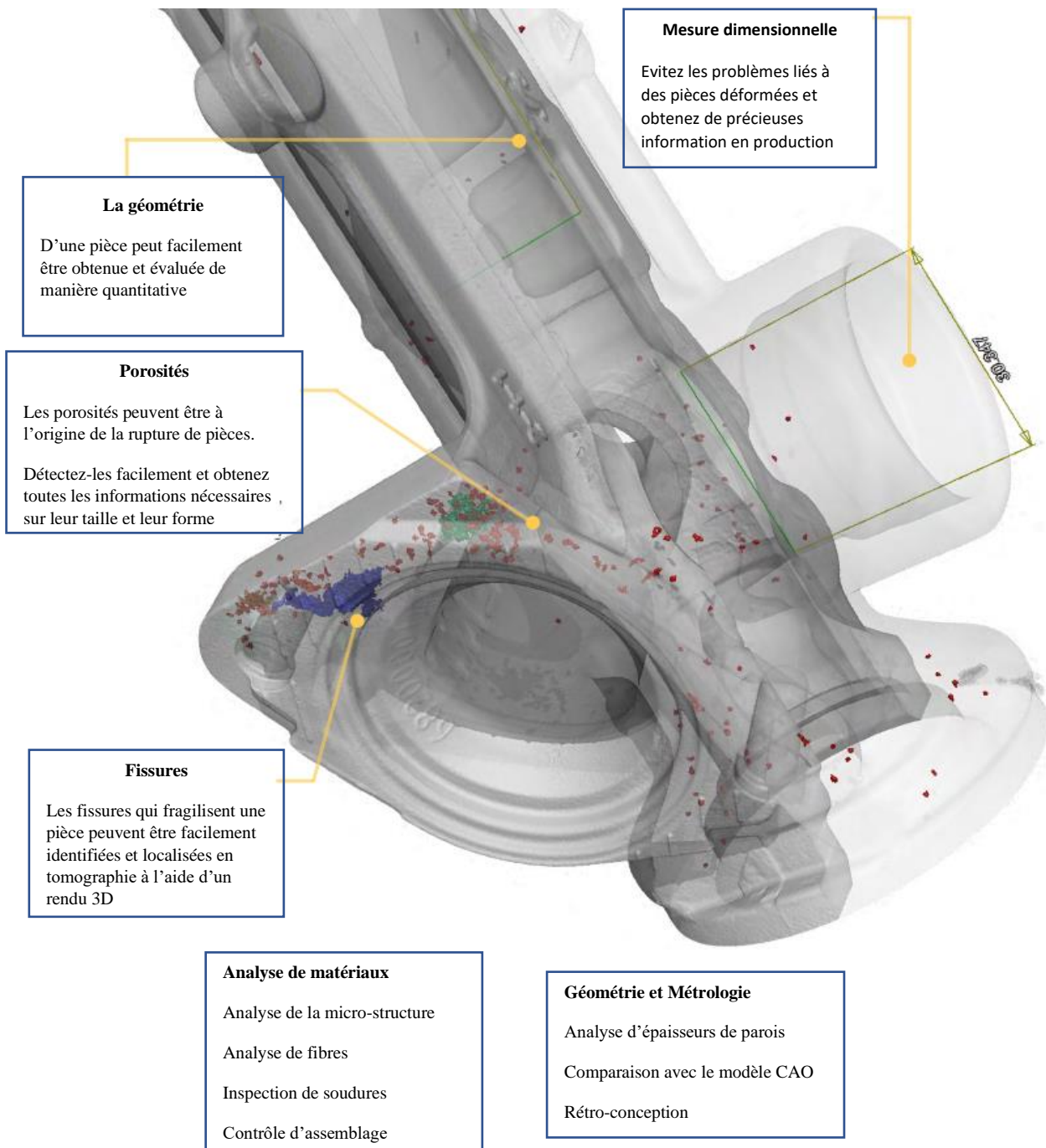


Figure II-23 : Les applications industrielles.[24]

II.5.3.4.3. Réaliser des contrôles dimensionnels

Outre les applications de santé-matière, la tomographie offre également la possibilité de réaliser des contrôles dimensionnels de différents types. Malgré des résolutions moins importantes que des machines tridimensionnelles classiques (quelques μm), la tomographie permet d'accéder aux faces cachées des pièces complexes, comme les culasses de moteurs. Il est alors possible, à l'aide de logiciels d'analyse adaptés, de comparer la forme interne de la pièce avec la CAO originale, de mesurer les épaisseurs de parois ou encore de vérifier la conformité de certaines cotes par rapport au plan (Figure II-24).

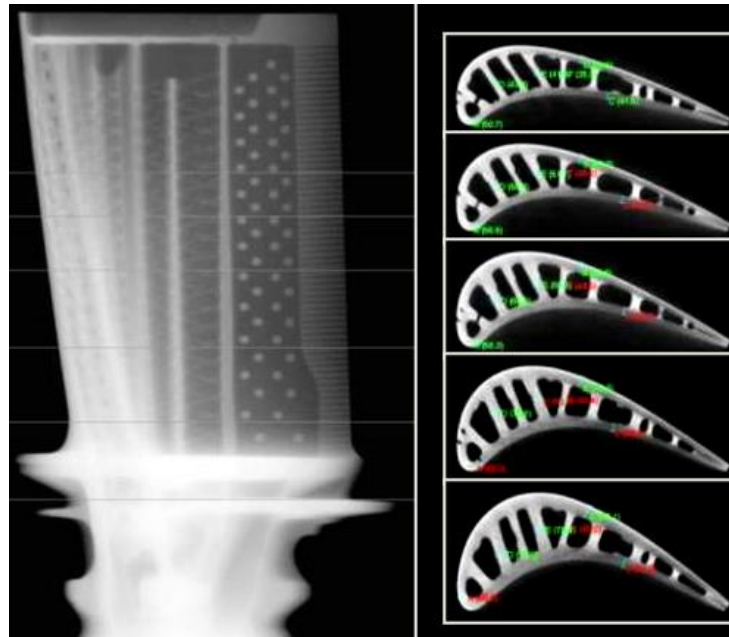


Figure II-24 : Inspection des aubes de turbine

Un exemple de comparaison 3D avec la CAO est donné sur une culasse en aluminium. Après superposition du volume scanné avec la CAO de référence, un calcul des écarts dimensionnels entre les 2 volumes est réalisé. Le résultat est donné sous forme de code couleur directement appliquée sur le volume 3D et sur les coupes 2D. L'incertitude de mesure dimensionnelle sur les micro-tomographes est généralement égale à un centième de la longueur (mesurée en millimètre) auquel s'ajoute une erreur systématique de quelques micromètres (typiquement entre 2,5 μm et 10 μm selon les équipements). Bien que ce type d'incertitude ne s'applique pas directement à toutes les analyses dimensionnelles, il permet aujourd'hui de mieux encadrer ces dernières. [25]

CHAPITRE III

Les logiciels de contrôle et traitement des nuages de points

III.1. Introduction :

Les logiciels de contrôle et traitement des nuages de points sont des outils informatiques qui permettent de manipuler des données en trois dimensions. Les nuages de points sont des ensembles de points dans l'espace, chacun étant défini par sa position dans un système de coordonnées XYZ et éventuellement par d'autres attributs tels que la couleur ou l'intensité du point. Ces données peuvent provenir de diverses sources, telles que des scanners laser, des capteurs de profondeur ou des caméras 3D.

Les logiciels de contrôle et traitement des nuages de points sont utilisés dans de nombreux domaines, tels que la conception de produits, la construction, l'architecture, l'arpentage, la cartographie, la géologie, la médecine et la recherche. Ils permettent de modéliser des objets en trois dimensions, de mesurer des distances et des volumes, de détecter des changements ou des défauts dans des structures, de créer des cartes de terrain, de simuler des environnements et bien plus encore.

Ces logiciels offrent une large gamme de fonctionnalités, notamment la visualisation 3D, la segmentation de nuages de points, l'extraction de caractéristiques, la modélisation de surfaces, la fusion de nuages de points, la comparaison de nuages de points, la mesure de distances et de volumes, la création de maillages, la détection de défauts et l'analyse statistique.

Les logiciels de contrôle et traitement des nuages de points sont de plus en plus utilisés dans l'industrie et la recherche, car ils offrent des avantages significatifs en termes de précision, de rapidité et de coût par rapport aux méthodes traditionnelles.

III.2. Développement des logiciels de contrôle et traitement des nuages de points :

Le développement des logiciels de contrôle et de traitement des nuages de points a considérablement évolué ces dernières années, grâce à l'augmentation de la quantité de données collectées par les scanners 3D et les caméras LiDAR. Les nuages de points sont des ensembles de points tridimensionnels qui permettent de représenter des objets ou des surfaces avec une grande précision.

Les logiciels de contrôle des nuages de points permettent de s'assurer de la qualité des données collectées, en vérifiant l'exactitude des mesures et en éliminant les points aberrants ou les données manquantes. Ils permettent également de corriger les erreurs de géoréférencement et de calibrage, afin de garantir la cohérence des données dans l'espace et dans le temps.

Les logiciels de traitement des nuages de points permettent de réaliser une grande variété de tâches, telles que la segmentation des objets, la reconstruction de surfaces, la modélisation 3D, l'analyse de la topologie, la mesure des distances et des volumes, etc. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines, tels que la cartographie, la modélisation des bâtiments, l'ingénierie, la surveillance de l'environnement, la médecine, etc.

Certains des logiciels les plus populaires pour le contrôle et le traitement des nuages de points sont AutoCAD, Rhino, 3DReshaper, MeshLab, CloudCompare, Cyclone, Leica Geosystems, Faro, Trimble, Agisoft, Pix4D, et bien d'autres. Ces logiciels offrent une large gamme de fonctionnalités avancées, telles que la réduction de bruit, la fusion de nuages de points, la modélisation de texture, l'alignement de nuages de points, la reconnaissance de formes, etc.

En résumé, le développement des logiciels de contrôle et de traitement des nuages de points a permis de mieux comprendre et exploiter les données 3D. Ces logiciels offrent des outils puissants pour la visualisation, l'analyse et la manipulation des nuages de points, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour de nombreux domaines d'application.

III.3. Algorithmes de traitements de nuages de points :

Il existe de nombreux algorithmes de traitement de nuages de points qui sont utilisés pour extraire des informations et des caractéristiques à partir de ces données. Voici quelques exemples d'algorithmes de traitement de nuages de points :

1. Filtrage de bruit : Les nuages de points peuvent contenir du bruit, c'est-à-dire des points qui ne sont pas réellement représentatifs de l'objet ou de la surface numérisée. Les algorithmes de filtrage de bruit permettent d'éliminer ces points indésirables pour obtenir un nuage de points plus précis et plus propre.
2. Segmentation : La segmentation consiste à identifier les différents objets présents dans le nuage de points en les séparant en sous-ensembles. Cette technique permet de diviser le nuage de points en parties plus petites et plus facilement gérables.
3. Reconstruction de surfaces : Les algorithmes de reconstruction de surfaces permettent de créer des modèles de surface à partir des nuages de points. Ces algorithmes sont souvent utilisés pour la modélisation 3D ou la reconstruction de surfaces pour des analyses plus approfondies.
4. Alignement de nuages de points : L'alignement de nuages de points consiste à superposer plusieurs nuages de points pour créer un modèle global. Les algorithmes d'alignement de nuages de points sont souvent utilisés en reconnaissance de formes, en ingénierie inverse ou pour la fusion de données issues de plusieurs sources.
5. Extraction de caractéristiques : Les algorithmes d'extraction de caractéristiques permettent d'identifier et d'extraire des caractéristiques spécifiques du nuage de points, telles que des bords, des coins ou des points de rupture. Ces caractéristiques peuvent ensuite être utilisées pour l'analyse ou la modélisation.
6. Reconnaissance d'objets : Les algorithmes de reconnaissance d'objets permettent d'identifier des objets ou des formes spécifiques à partir du nuage de points. Ils sont souvent utilisés pour la détection d'objets dans les applications de vision par ordinateur.
7. Analyse de topologie : Les algorithmes d'analyse de topologie permettent d'analyser la structure et les relations entre les différents éléments du nuage de points. Ils sont souvent utilisés pour l'analyse de réseaux ou de surfaces.

Nous allons examiner dans ce chapitre les logiciels les plus pertinents pour notre étude, y compris ceux-ci :

III.4. Geomagic :

Geomagic est une suite logicielle de traitement de nuages de points et de modélisation 3D. Elle est développée par la société américaine 3D Systems, qui est spécialisée dans la fabrication additive et les solutions de numérisation 3D.

Geomagic propose un large éventail d'outils pour la création de modèles 3D à partir de données numérisées, telles que des nuages de points, des scans CT ou des images DICOM. Les fonctionnalités de Geomagic incluent la retopologie, la reconstruction de surfaces, la mesure dimensionnelle, la détection de défauts, la comparaison de modèles et la génération de maillages.

Les produits Geomagic sont utilisés dans de nombreux domaines, notamment l'aérospatiale, l'automobile, l'ingénierie, la joaillerie, la santé, l'art et la création de jeux vidéo. Ils sont appréciés pour leur facilité d'utilisation, leur précision et leur capacité à traiter de grandes quantités de données de manière rapide et efficace.

En plus des outils de modélisation 3D, Geomagic propose également des solutions pour la gestion de projets de numérisation, la création de rapports d'inspection et l'analyse statistique de données. La gamme de produits Geomagic est en constante évolution pour répondre aux besoins des utilisateurs professionnels et des industries émergentes.

III.4.1. Les logiciel Geomagic :

Geomagic propose une gamme de logiciels de traitement de nuages de points et de modélisation 3D, adaptée aux besoins des utilisateurs professionnels et des industries émergentes. Voici quelques-uns des logiciels les plus populaires de la suite Geomagic (Figure III.1) :



Figure III.1 : Gamme des logiciels Geomagic

La suite Geomagic propose également d'autres logiciels et solutions pour la numérisation 3D, la création de modèles 3D, la gestion de projets et l'analyse de données. Les produits Geomagic sont largement utilisés dans l'industrie, la recherche et les domaines de la santé et des arts pour la numérisation, la modélisation et la fabrication additive.

III.4.1.1. Geomagic Design X :

Geomagic Design X est un logiciel de CAO (conception assistée par ordinateur) destiné à la modélisation de pièces et d'assemblages à partir de données numérisées. Le logiciel est particulièrement utile pour la rétro-ingénierie de pièces existantes, la conception de pièces de remplacement et l'optimisation de pièces pour une utilisation spécifique.

Geomagic Design X utilise des nuages de points, des maillages et des images pour créer des modèles CAO précis en 3D. Le logiciel offre des fonctionnalités de retopologie automatique pour créer des modèles CAO de haute qualité, même à partir de données de numérisation brutes. Les utilisateurs peuvent également créer des surfaces hybrides en combinant des surfaces libres et des surfaces surfaciques.

Le logiciel est compatible avec un large éventail de formats de fichiers, ce qui facilite l'importation et l'exportation de données entre différents systèmes de numérisation 3D et logiciels de CAO. Il offre également des outils avancés pour la création de moules, la conception de pièces d'usinage, la modélisation de géométries complexes et la création de modèles paramétriques.

Geomagic Design X (Figure III.2) est largement utilisé dans les industries manufacturières, la conception de produits, la rétro-ingénierie et la restauration de pièces historiques. Le logiciel est apprécié pour sa facilité d'utilisation, sa précision de modélisation et ses fonctionnalités avancées de CAO.

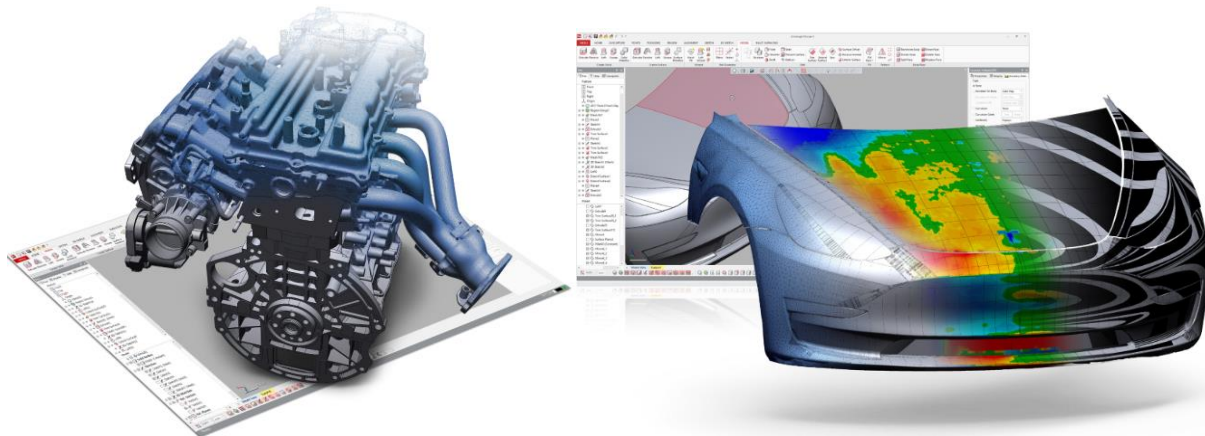


Figure III.2 : Logiciel Geomagic Design X. [26]

Pour la partie expérimentale de notre étude, nous utilisons le logiciel Geomagic Design X, pour lequel nous avons suivi une méthodologie de travail spécifique.

III.4.1.2. Logiciel Geomagic Wrap :

Geomagic Wrap est un logiciel de traitement de nuages de points et de modélisation 3D développé par la société américaine 3D Systems. Il permet de convertir des nuages de points provenant de scanners 3D ou d'autres sources en modèles 3D haute résolution, prêts pour l'impression 3D, la conception assistée par ordinateur (CAO) ou d'autres applications.

Geomagic Wrap est utilisé dans une variété de secteurs industriels, tels que l'ingénierie, la fabrication, l'architecture, la médecine et l'art. Il permet de traiter des données de numérisation de différentes sources, comme des scanners laser ou des caméras de capture de mouvement, et de les aligner, les fusionner et les nettoyer pour obtenir un modèle 3D précis.

Le logiciel offre également des fonctionnalités avancées pour la modélisation 3D, telles que la création de surfaces, la retopologie, la création de textures et la projection de textures. En outre, il intègre des outils de mesure et d'analyse pour aider les utilisateurs à évaluer la qualité et l'exactitude de leurs modèles 3D.

Geomagic Wrap (Figure III.3) est apprécié pour sa grande précision, sa vitesse de traitement élevée et sa capacité à gérer de grands ensembles de données. Il est compatible avec une variété de formats de fichiers, tels que les fichiers OBJ, STL, VRML et PLY, ce qui facilite l'intégration dans des flux de travail existants.

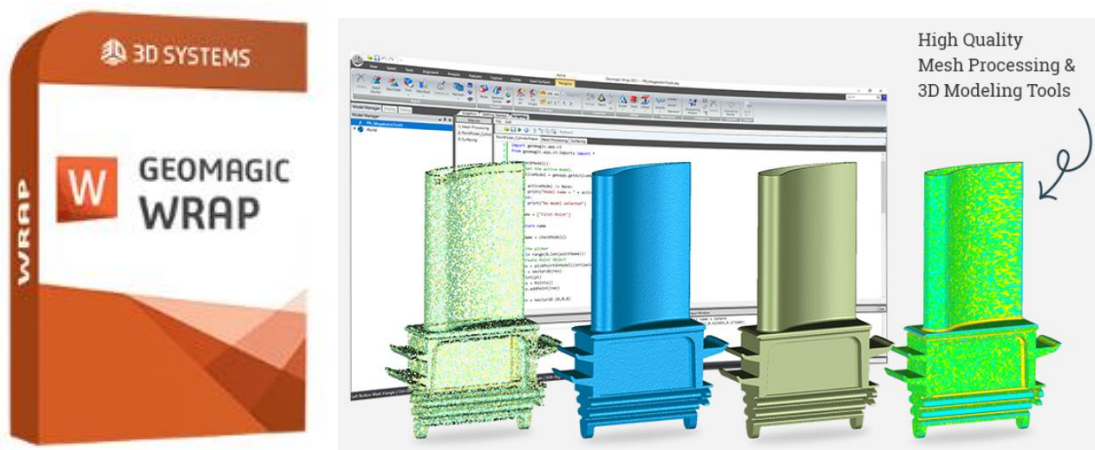


Figure III.3 : Logiciel Geomagic Wrap

III.4.1.3. Geomagic control X :

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

Le logiciel utilise des données de numérisation 3D pour effectuer des mesures dimensionnelles précises, notamment des mesures de la distance, de l'angle, de la planéité, de la concentricité, de la cylindricité, de la perpendicularité et d'autres mesures géométriques complexes. Les utilisateurs peuvent également générer des rapports d'inspection professionnels pour documenter les résultats et les comparer avec les spécifications de conception.

Geomagic Control X (Figure III.4) propose une interface utilisateur intuitive, basée sur des workflows, pour aider les utilisateurs à naviguer facilement dans les différentes étapes du processus d'inspection. Il offre également des fonctionnalités avancées telles que la détection automatique de défauts, la comparaison de modèles et l'analyse statistique pour améliorer la productivité et la qualité.

Le logiciel est largement utilisé dans les industries manufacturières pour le contrôle qualité des produits et la détection de défauts. Il est compatible avec une large gamme de systèmes de numérisation 3D et de formats de fichiers pour une intégration facile dans les workflows existants.

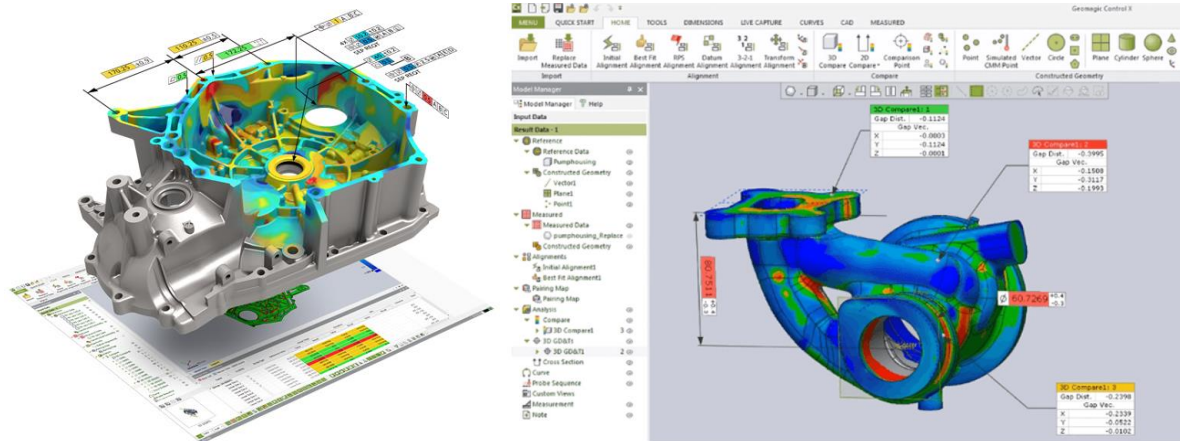


Figure III.4 : Logiciel Geomagic Contrôle X. [27]

III.4.1.4. Geomagic for SOLIDWORKS :

Geomagic for SOLIDWORKS est un logiciel de numérisation 3D et de rétro-ingénierie qui s'intègre parfaitement à SOLIDWORKS, un logiciel de CAO populaire. Il permet aux utilisateurs de capturer des données de numérisation 3D et de les utiliser directement dans SOLIDWORKS pour la modélisation, la simulation et la fabrication.

Le logiciel offre des fonctionnalités avancées pour la rétro-ingénierie de pièces, y compris la création automatique de géométries surfaciques et la détection de fonctionnalités. Les utilisateurs peuvent capturer des données de numérisation à partir de scanners 3D ou de bras de mesure, puis les importer directement dans SOLIDWORKS pour la création de modèles CAO précis.

Les utilisateurs de Geomagic for SOLIDWORKS peuvent également créer des modèles CAO à partir de données de numérisation brutes et générer des géométries surfaciques complexes à l'aide d'outils avancés de modélisation. Le logiciel permet également de détecter automatiquement les fonctionnalités de pièces telles que les trous, les rainures et les bossages pour simplifier le processus de modélisation.

Geomagic for SOLIDWORKS (Figure III.5) est largement utilisé dans les industries manufacturières pour la rétro-ingénierie, la conception de produits, la création de modèles CAO précis et la fabrication de pièces de haute qualité. Le logiciel est apprécié pour son intégration facile avec SOLIDWORKS, sa précision de numérisation 3D et ses fonctionnalités avancées de rétro-ingénierie.



Figure III.5: Logiciel Geomagic for SOLIDWORKS

III.4.1.5. Logiciel Geomagic Freeform :

Geomagic Freeform est un logiciel de sculpture numérique et de conception de formes organiques développé par la société américaine 3D Systems. Il permet de concevoir des formes complexes et organiques en utilisant une approche intuitive basée sur la sculpture numérique.

Geomagic Freeform est utilisé dans une variété de secteurs industriels, tels que la conception de produits, la bijouterie, l'automobile, l'aérospatiale et les effets spéciaux pour le cinéma. Il permet de créer des formes organiques à partir de zéro ou de modifier des modèles existants en utilisant des outils de sculpture, de lissage, de gravure et de texturage.

Le logiciel offre également des fonctionnalités avancées pour la modélisation 3D, telles que la rétroingénierie, la numérisation, la mesure et l'analyse. En outre, il est compatible avec une variété de technologies d'impression 3D, ce qui permet aux utilisateurs de créer des modèles physiques de leurs conceptions.

Geomagic Freeform (Figure III.6) est apprécié pour sa grande flexibilité et sa capacité à générer des formes organiques avec une grande précision et une grande finesse. Il est compatible avec une variété de formats de fichiers, tels que les fichiers OBJ, STL et IGES, ce qui facilite l'intégration dans des flux de travail existants.

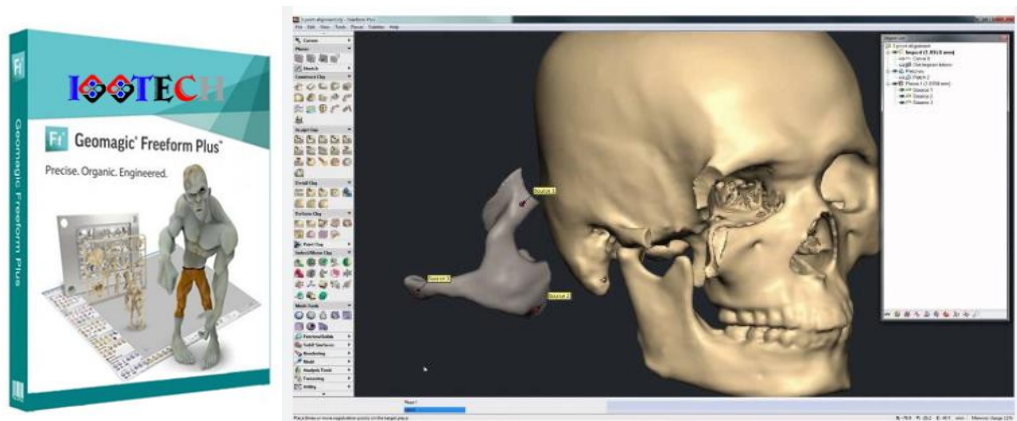


Figure III.6: Logiciel Geomagic Freeform

III.5. Logiciel Cam2 Measure:

CAM2 Measure for Arm (Figure III.7) est une version du logiciel de mesure dimensionnelle en 3D CAM2 Measure spécialement conçue pour les bras de mesure portables. Le logiciel permet de programmer et de contrôler les bras de mesure portables pour effectuer des mesures précises de pièces manufacturées.

CAM2 Measure for Arm offre une grande flexibilité pour la mesure de différentes géométries de pièces, y compris des formes complexes, des contours, des trous, des rainures et des surfaces courbes. Le logiciel est équipé d'une large gamme d'outils de mesure, y compris des sondes tactiles et sans contact, ainsi que des capteurs de lumière bleue pour la numérisation 3D.

Le logiciel permet aux utilisateurs de programmer des séquences de mesures automatisées pour accélérer le processus de mesure et de générer des rapports d'inspection détaillés pour documenter les résultats. Les utilisateurs peuvent également visualiser les données de mesure en 3D pour une meilleure compréhension des résultats de mesure.

CAM2 Measure for Arm est compatible avec une large gamme de bras de mesure portables et offre une grande flexibilité pour les workflows d'inspection. Le logiciel est largement utilisé dans les industries manufacturières pour la mesure dimensionnelle de haute précision et le contrôle qualité des produits.

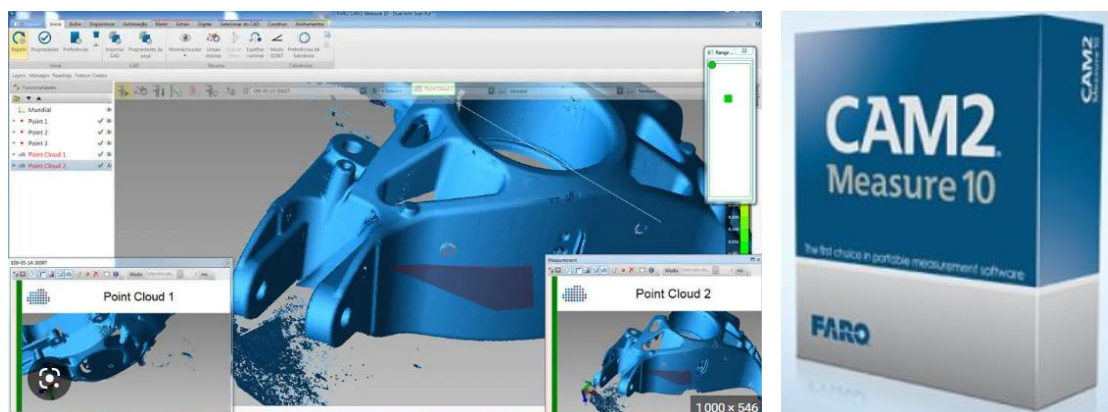


Figure III.7 : Logiciel Cam2 Measure

III.6. Logiciel COMET plus :

COMET plus (Figure III.8) est un logiciel de simulation numérique et d'analyse de modèles développé par la société ESI Group. Il permet de modéliser et de simuler des phénomènes physiques complexes, tels que les écoulements de fluides, les transferts de chaleur, les vibrations, l'acoustique, les processus de fabrication et d'autres phénomènes de dynamique des structures.

Le logiciel COMET plus utilise la méthode des éléments finis (FEM) pour résoudre les équations mathématiques qui décrivent les phénomènes physiques. Il est capable de modéliser des matériaux isotropes et anisotropes, ainsi que des structures composites et des assemblages de plusieurs pièces.

COMET plus offre une interface graphique conviviale pour la création, la manipulation et l'analyse de modèles. Les utilisateurs peuvent visualiser les résultats de simulation en temps réel et générer des rapports détaillés pour documenter les résultats. Le logiciel est également équipé d'outils de post-traitement avancés pour l'analyse de données, y compris l'analyse spectrale et la détection de modes.

Le logiciel COMET plus est utilisé dans de nombreuses industries, telles que l'aéronautique, l'automobile, l'énergie, l'industrie lourde et d'autres secteurs, pour la conception et l'optimisation de produits, l'analyse de performances et la réduction des coûts de développement.

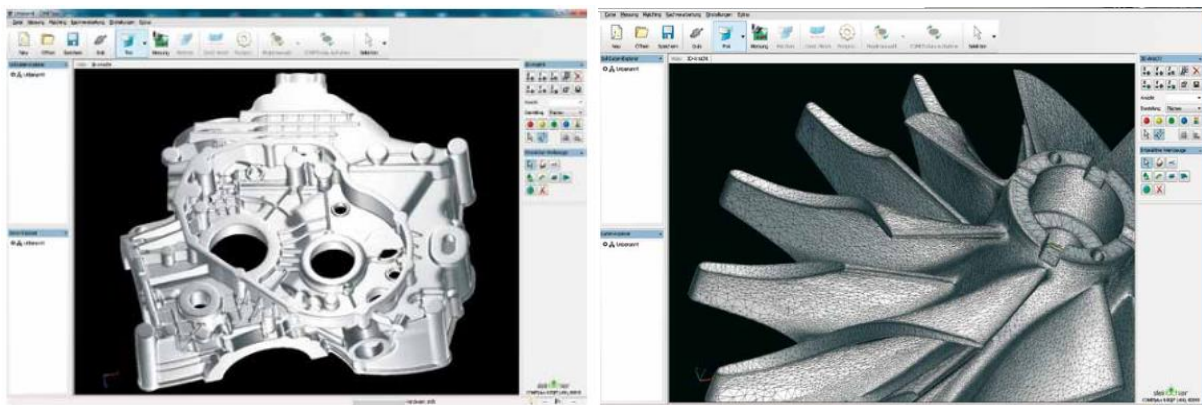


Figure III.8 : Logiciel COMET plus

III.7. Logiciel Polyworks :

PolyWorks (Figure III.9) est un logiciel de métrologie 3D et d'inspection de qualité développé par la société québécoise InnovMetric Software. Il est utilisé pour effectuer des mesures précises sur des pièces et des assemblages complexes en utilisant des scanners 3D, des bras de mesure ou des machines à mesurer tridimensionnelles (CMM).

PolyWorks permet de visualiser les données de mesure en temps réel, d'analyser les défauts et les écarts de tolérance, et de générer des rapports détaillés sur les résultats de mesure. Le logiciel est utilisé dans une variété de secteurs industriels, tels que l'aéronautique, l'automobile, la construction navale, l'énergie, l'ingénierie médicale et la fabrication de moules et d'outils.

PolyWorks est reconnu pour sa convivialité et sa grande flexibilité. Il est compatible avec une large gamme de dispositifs de mesure 3D et de logiciels CAO (conception assistée par ordinateur), ce qui facilite l'intégration dans des processus de production existants. En outre, PolyWorks dispose d'une communauté active d'utilisateurs qui partagent des connaissances et des astuces pour tirer le meilleur parti du logiciel.

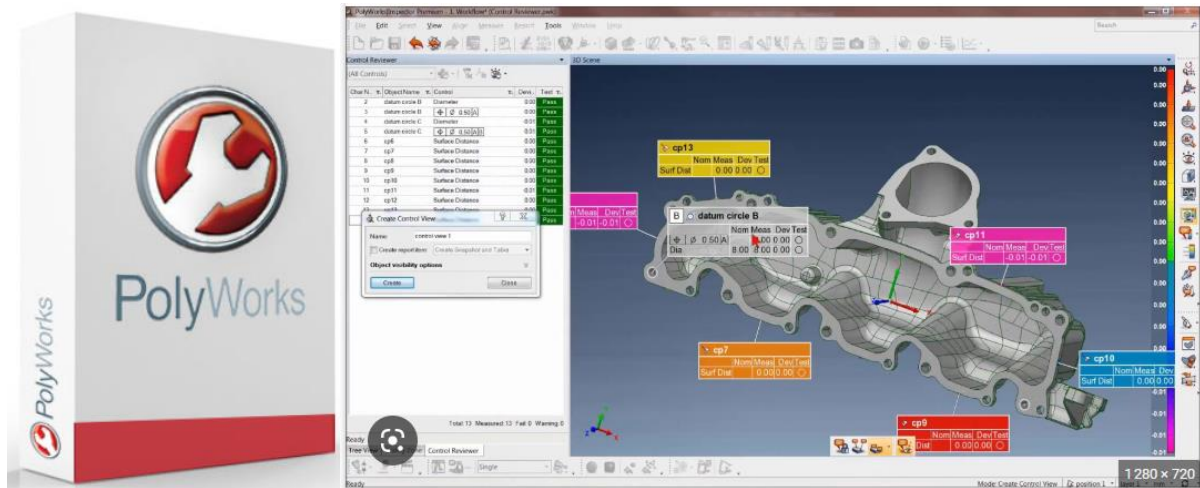


Figure III.9: Logiciel Polyworks

III.8. Logiciel Gom inspect :

GOM Inspect (Figure III.10) est un logiciel d'inspection de mesure 3D et d'analyse de données développé par la société allemande GOM GmbH. Il permet de traiter des données de numérisation provenant de scanners 3D, de bras de mesure, de CMM et d'autres sources pour effectuer des mesures précises et des analyses de qualité.

GOM Inspect est utilisé dans une variété de secteurs industriels, tels que l'aéronautique, l'automobile, l'ingénierie médicale, la fabrication de moules et d'outils, et d'autres industries de production. Il permet de visualiser et d'analyser des nuages de points, des maillages et des modèles 3D en utilisant une variété d'outils d'inspection et de mesure, tels que la mesure de distance, l'analyse de forme, l'analyse de rugosité et l'analyse de déformation.

Le logiciel offre également des fonctionnalités avancées pour l'analyse de données, telles que l'analyse de tendance, l'analyse statistique et la comparaison de modèles. En outre, il permet de générer des rapports détaillés sur les résultats de mesure et les analyses effectuées.

GOM Inspect est apprécié pour sa grande précision, sa vitesse de traitement élevée et sa capacité à gérer de grands ensembles de données. Il est compatible avec une variété de formats de fichiers, tels que les fichiers STL, VRML, OBJ, IGES, STEP, et DXF, ce qui facilite l'intégration dans des flux de travail existants. GOM Inspect est également disponible en téléchargement gratuit pour une utilisation non commerciale.

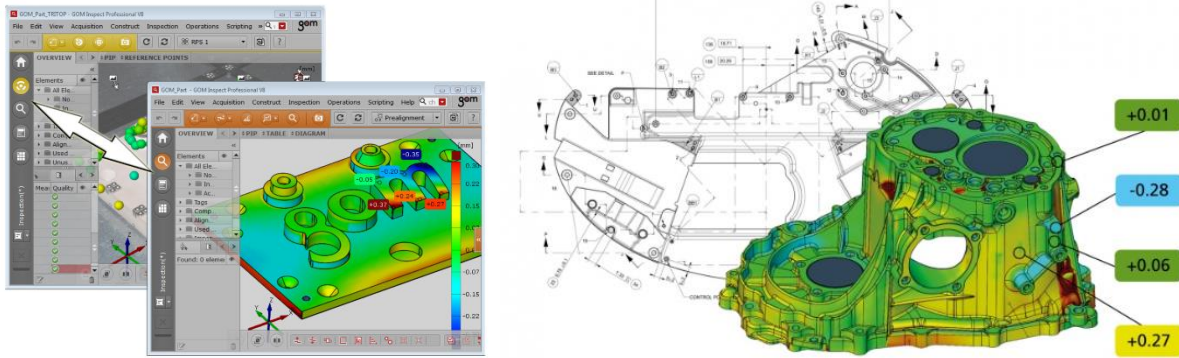


Figure III.10: Logiciel GOM inspect

III.9. Logiciel 3D Reshaper :

3DReshaper (Figure III.11) est un logiciel de traitement de nuages de points et de modélisation 3D développé par la société française 3DReshaper SAS. Il permet de traiter et d'analyser des données de numérisation provenant de scanners 3D, de lidars, de photogrammétrie, de drones et d'autres sources pour créer des modèles 3D précis et des produits finaux.

3DReshaper est utilisé dans une variété de secteurs industriels, tels que l'ingénierie civile, la construction, la surveillance de sites, la foresterie, la conservation de patrimoine et l'industrie minière. Il permet de créer des modèles 3D à partir de nuages de points en utilisant des outils d'alignement, de nettoyage et de filtrage pour obtenir des surfaces précises. Le logiciel offre également des fonctionnalités avancées pour la modélisation 3D, telles que la création de maillage, la modélisation de surfaces complexes et la création de texturage.

Le logiciel offre également des outils d'analyse avancés, tels que l'analyse de déformation, l'analyse de volume, l'analyse de distance et l'analyse de section transversale. En outre, il est compatible avec une variété de formats de fichiers, tels que les fichiers LAS, LAZ, XYZ, PTS et PLY.

3DReshaper est apprécié pour sa grande précision, sa vitesse de traitement élevée et sa capacité à gérer de grands ensembles de données. Il permet également de travailler avec des données de nuage de points provenant de différentes sources et de les intégrer facilement dans des flux de travail existants.

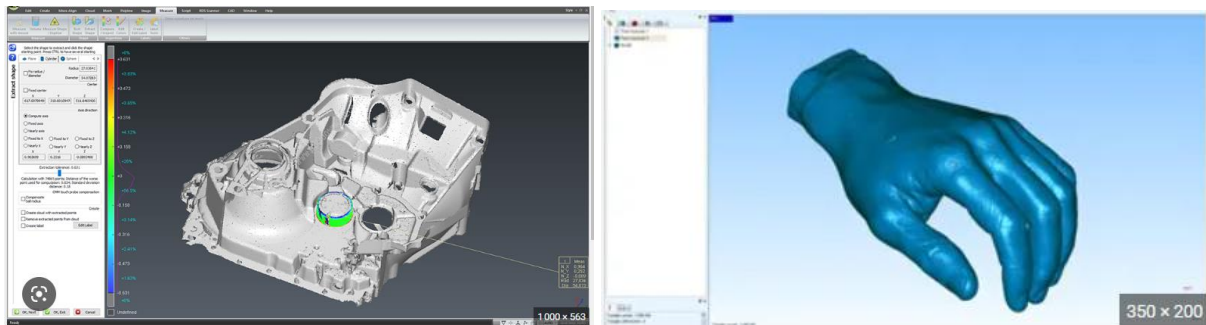


Figure III.11 : Logiciel 3DReshaper

III.10. Logiciel PC-DIMIS :

PC-DMIS (Figure III.12) est un logiciel de mesure dimensionnelle en 3D qui permet de programmer et de contrôler les machines de mesure à coordonnées (MMT) pour inspecter la géométrie des pièces manufacturées. Le logiciel est développé par Hexagon Manufacturing Intelligence, une entreprise spécialisée dans les solutions de mesure de haute précision.

PC-DMIS est un logiciel de CFAO (Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur) pour la mesure dimensionnelle. Il permet aux utilisateurs de créer des programmes de mesure pour des machines de mesure à coordonnées (MMT) pour inspecter des pièces manufacturées en utilisant une variété de techniques de mesure, y compris la mesure de la distance, l'angle, la planéité, la cylindricité, la perpendicularité et la concentricité, ainsi que d'autres mesures complexes.

Le logiciel permet également aux utilisateurs d'analyser les résultats de mesure et de générer des rapports d'inspection détaillés pour documenter les résultats. Les utilisateurs peuvent également visualiser les données de mesure en 3D pour une meilleure compréhension des résultats de mesure.

PC-DMIS est compatible avec une large gamme de machines de mesure à coordonnées et offre une grande flexibilité pour les workflows d'inspection. Le logiciel est largement utilisé dans les industries manufacturières pour la mesure dimensionnelle de haute précision et le contrôle qualité des produits.

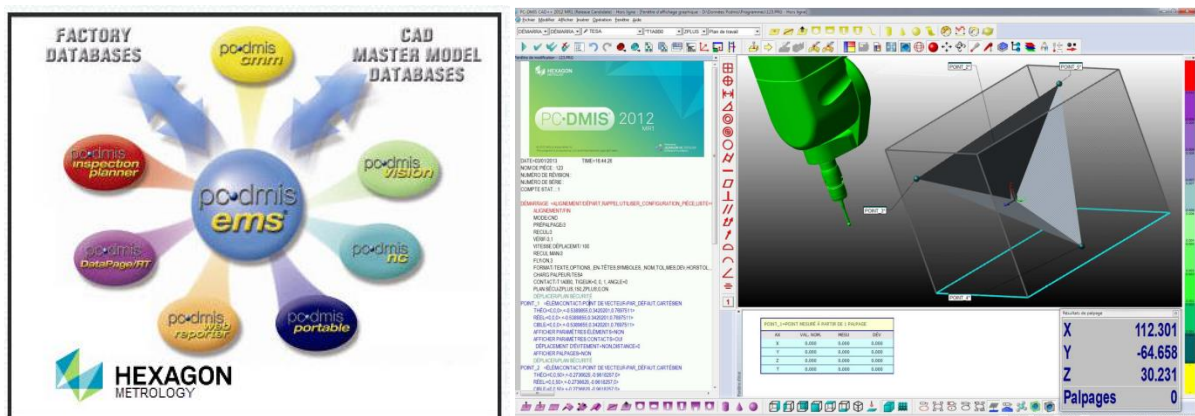


Figure III.12 : Logiciel PC-DIMIS. [28]

III.10.1. La gamme des logiciels PC-DMIS :

La gamme de logiciels PC-DMIS comprend plusieurs éditions qui s'adaptent aux besoins spécifiques de chaque entreprise et de chaque application de mesure. Voici une brève description des différentes éditions :

1. PC-DMIS Pro : c'est l'édition de base de PC-DMIS, qui offre toutes les fonctionnalités essentielles pour la programmation de mesures de base.
2. PC-DMIS CAD : cette édition ajoute la fonctionnalité de modélisation 3D et de CAO pour la création de modèles de pièces.
3. PC-DMIS CAD++ : cette édition étend les fonctionnalités de PC-DMIS CAD en ajoutant des outils d'analyse de surface et de nuage de points.

4. PC-DMIS Pro CAD : cette édition combine les fonctionnalités de PC-DMIS Pro et de PC-DMIS CAD.
5. PC-DMIS Pro CAD++ : cette édition combine les fonctionnalités de PC-DMIS Pro, de PC-DMIS CAD et de PC-DMIS CAD++.
6. PC-DMIS NC : cette édition ajoute des fonctionnalités pour la programmation de machines de mesure à commande numérique.
7. PC-DMIS Vision : cette édition est conçue pour les applications de mesure optique et de vision.
8. PC-DMIS Reshaper : cette édition est destinée aux applications de rétro-ingénierie et de numérisation 3D.

CHAPITRE IV

Mesure et modélisation des pièces de formes complexes

IV.1. Introduction :

La mesure et la modélisation des pièces de formes complexes sont des aspects cruciaux de nombreux domaines, tels que l'ingénierie mécanique, la conception de produits, l'industrie automobile et aéronautique, la construction navale, l'architecture, la production de pièces en série, etc.

La mesure de pièces de formes complexes consiste à obtenir des informations précises sur la géométrie de l'objet, telles que la longueur, la largeur, la hauteur, le diamètre, l'angle, la courbure, la rugosité, etc. Cela peut être fait à l'aide d'instruments de mesure tels que des jauges, des micromètres, des projecteurs de profil, des scanners laser, des caméras 3D, des tomographes à rayons X, etc.

La modélisation de pièces de formes complexes implique la création de modèles mathématiques tridimensionnels qui représentent la géométrie de l'objet. Cela peut être fait à l'aide de logiciels de CAO (conception assistée par ordinateur) ou de FAO (fabrication assistée par ordinateur), qui permettent de créer des modèles précis, de les modifier, de les vérifier et de les convertir en formats utilisables pour la fabrication.

La mesure et la modélisation de pièces de formes complexes sont essentielles pour assurer la qualité des produits, optimiser les processus de fabrication, réduire les coûts et les délais de production, et améliorer la fiabilité et la sécurité des produits. Ces techniques sont également utilisées pour la rétro-ingénierie, la conception de nouveaux produits, la vérification de conformité aux normes et réglementations, la simulation de performances, la gestion de la qualité et l'amélioration continue des processus.

IV.2. Mesure tridimensionnelle des pièces de formes complexes :

En général la mesure tridimensionnelle est divisée en deux parties principales, mesure par contacte (palpage) et mesure à distance (scan)

IV.2.1 Mesure par contacte (palpage) :

La mesure par contact palpage est une technique de mesure de la géométrie d'une pièce à l'aide d'un système de palpage qui touche la surface de la pièce à mesurer. Cette technique est largement utilisée dans l'industrie pour la mesure de pièces de formes complexes telles que des engrenages, des pièces de moteurs, des moules, des matrices et des pièces moulées.

Le système de palpage est constitué d'une sonde qui est montée sur un bras articulé ou un système de mesure motorisé. La sonde est positionnée en contact avec la surface de la pièce à mesurer et des données de mesure sont obtenues en déplaçant la sonde dans différentes directions pour mesurer les dimensions, les angles, les rayons, les diamètres et les formes de la pièce.

La mesure par contact palpage (Figure IV.1) peut être effectuée manuellement ou de manière automatisée en utilisant des systèmes de mesure CNC (Commande Numérique par Ordinateur). Les données de mesure sont affichées sur un écran et peuvent être enregistrées pour une analyse ultérieure ou pour une utilisation dans des logiciels de modélisation 3D.

Bien que la mesure par contact palpasse soit une technique de mesure précise et largement utilisée, elle peut présenter certains inconvénients, tels que la nécessité de toucher la surface de la pièce, ce qui peut entraîner une usure ou des dommages, ainsi que des erreurs de mesure dues aux variations de pression exercée sur la sonde lors des mesures. Cependant, ces problèmes peuvent être minimisés en utilisant des techniques de calibration et des systèmes de compensation d'erreur pour améliorer la précision et la fiabilité des résultats de mesure.

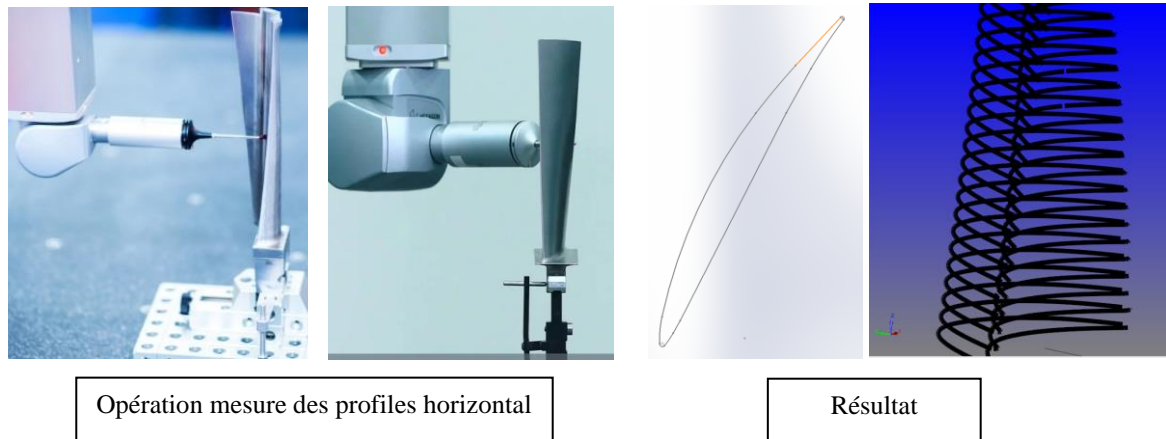


Figure IV.1: Exemple d'enlèvement des profils sur la pale d'une aube turbine

IV.2.1.1 Palpeur :

Un palpeur de mesure tridimensionnelle est un dispositif utilisé pour mesurer la géométrie de surfaces ou de pièces en trois dimensions. Il est généralement utilisé dans des applications d'inspection et de métrologie pour assurer la qualité des pièces fabriquées.

Le palpeur est constitué d'une sonde montée sur un bras articulé ou une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT). La sonde peut être mécanique, optique ou laser, et elle est utilisée pour toucher la surface de la pièce et enregistrer sa position. Les données de mesure sont ensuite traitées par un logiciel de métrologie pour produire des mesures de la forme, de la position, de l'orientation et des dimensions de la pièce.

Il existe deux types de palpeur, palpeur électronique à déclenchement pour MMT et palpeur rigide pour bras articulé.

IV.2.1.1.1 Palpeur électronique :

Le palpeur à déclenchement par contact (Figure IV.2), est inventé par Sir David McMurtry pour répondre à une demande spécifique de contrôle sur les moteurs Olympus utilisés sur l'avion Concorde. Ce produit novateur entraîne une révolution des mesures de coordonnées tridimensionnelles. L'ajout d'un palpeur électronique entraîna le besoin de nouveaux algorithmes logiciels pour calculer les mesures en fonction des signaux envoyés par le palpeur électronique et les règles. [29]

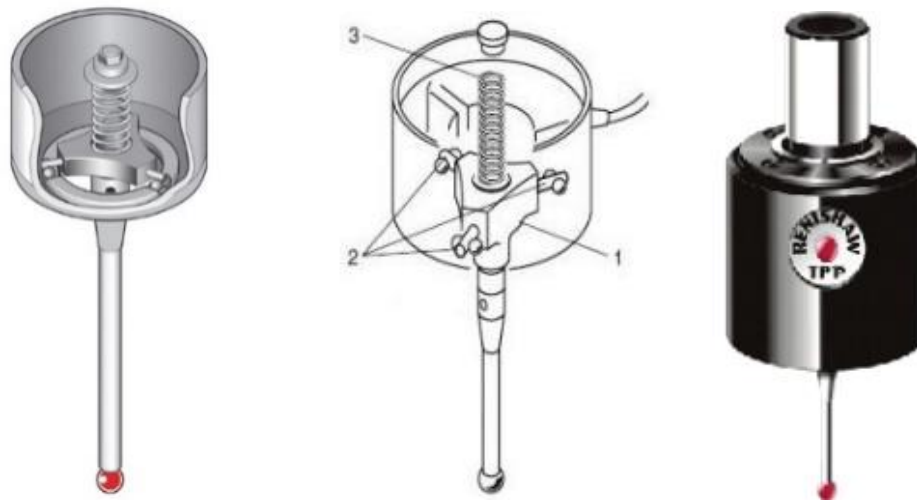


Figure IV.2: Palpeur à déclenchement par contact TP1. [29]

Les machines à mesurer deviennent motorisées, l'amélioration suivante consista à ajouter des moteurs à chaque axe et un système de contrôle électronique à la machine permettant de contrôler le mouvement via l'ordinateur.

Cela entraîna l'ajout au logiciel des algorithmes pour le déplacement et la mesure automatique d'éléments.

On pouvait alors exécuter une série d'instructions dans un ordre répétable; les premiers programmes-pièces étaient disponibles sur des bandes de papier perforées. On pouvait relancer le même programme-pièce chaque fois qu'une pièce devait être contrôlée.

- Algorithmes :

Les algorithmes de l'époque ne prenaient qu'un nombre minimum de points :

3 points pour un plan, 3 pour un diamètre, 2 points pour une ligne.

Pour améliorer la répétitivité des machines à mesurer, on ajouta au logiciel des algorithmes Best Fit qui permettaient de mesurer plusieurs points sur l'élément et d'utiliser la valeur moyenne pour définir sa taille et sa position. Lorsque les calculs multipoints furent disponibles, on ajouta des algorithmes pour la planéité, la circularité et la linéarité.

IV.2.1.1.2 Palpeur rigide :

Le palpeur rigide est généralement constitué d'un stylet en carbure de tungstène monté sur un corps rigide en acier inoxydable. L'extrémité du stylet est arrondie pour minimiser les dommages à la surface de la pièce lors des mesures. Le corps rigide du palpeur assure une grande précision de la mesure et une répétabilité des résultats.

Le palpeur rigide pour bras articulé (Figure IV.3) est capable de mesurer avec précision les caractéristiques géométriques telles que les angles, les rayons, les diamètres, les longueurs, les profils et les positions de la pièce. Il est largement utilisé dans l'industrie automobile, l'aérospatiale, l'industrie médicale, la fabrication de moules, la production d'équipements électroniques et dans d'autres applications de métrologie pour garantir la qualité des pièces fabriquées.



Figure IV.3: les palpeurs rigides pour bras articulés.

IV.2.2 Mesure à distance :

La mesure à distance (Figure IV.4) est une technique de mesure qui permet de mesurer des objets ou des surfaces sans contact physique. Cette technique utilise des équipements de mesure tels que des capteurs laser, des capteurs optiques, des caméras, des scanners 3D ou des radars pour mesurer la distance entre l'équipement et la surface de l'objet.

Les capteurs laser, par exemple, envoient des impulsions de lumière vers la surface de l'objet et mesurent le temps que prend la lumière pour revenir au capteur, ce qui permet de calculer la distance entre le capteur et la surface de l'objet. Les scanners 3D peuvent numériser la surface de l'objet à distance et créer une représentation numérique de sa forme.

La mesure à distance présente plusieurs avantages par rapport à la mesure par contact palpée. Elle est plus rapide, plus précise et moins susceptible de causer des dommages à l'objet mesuré. Elle peut également être utilisée pour mesurer des objets dans des endroits difficiles d'accès ou dangereux pour les humains, tels que des pièces mécaniques dans des machines en mouvement, des pipelines, des zones contaminées ou des espaces restreints.

La mesure à distance est largement utilisée dans de nombreux domaines, notamment l'industrie automobile, l'aérospatiale, la construction, l'architecture, la géologie, la météorologie, la cartographie, la télédétection, la surveillance et la sécurité. Les données de mesure peuvent être utilisées pour la conception de produits, l'analyse de la qualité, le contrôle des processus, la simulation de performances, la gestion de la maintenance et la sécurité.

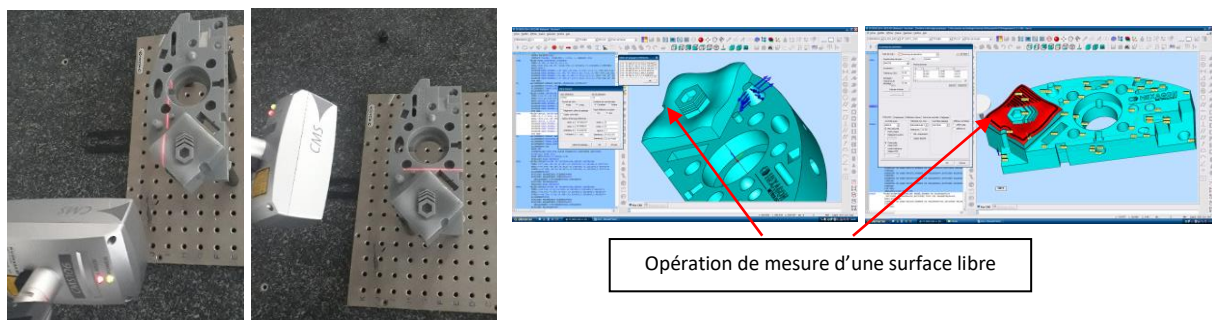


Figure IV.4: Exemple mesure à distance sur (MMT)

IV.3 Modélisation des surfaces :

La modélisation des surfaces est un domaine de l'informatique graphique qui vise à représenter des formes en trois dimensions (3D) dans un espace numérique. Les surfaces peuvent être créées à partir de différentes techniques de modélisation, telles que la modélisation polygonale, la modélisation par subdivision, la modélisation NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines), la modélisation de splines, la modélisation de surfaces implicites, la modélisation basée sur des voxels, la modélisation procédurale et d'autres encore.

IV.3.1 Les courbes paramétriques :

Les courbes paramétriques sont des courbes qui sont définies par des équations qui expriment les coordonnées x et y des points de la courbe en fonction d'un paramètre t . Le paramètre t est généralement un nombre réel qui varie dans une plage donnée, souvent de 0 à 1.

La forme de la courbe est déterminée par la façon dont les coordonnées x et y varient en fonction de t . Par exemple, si $x = \sin(t)$ et $y = \cos(t)$, cela produirait une courbe circulaire.

Les courbes paramétriques sont souvent utilisées en graphisme et en animation pour décrire des mouvements ou des trajectoires. Elles peuvent être utilisées pour représenter des formes complexes telles que des spirales, des ellipses et des courbes de Bézier.

Les courbes paramétriques sont un outil important dans l'informatique graphique pour la représentation de formes et de mouvements en 2D et en 3D. Elles offrent une grande flexibilité pour créer des courbes complexes et des formes courbes lisses, et sont largement utilisées dans les logiciels de CAO, les animations, les jeux vidéo et d'autres applications graphiques.

IV.3.1.1 Courbe de Bézier :

La courbe de Bézier est une courbe mathématique utilisée en infographie et en CAO pour représenter des formes courbes telles que des arcs, des cercles, des ellipses et des formes libres. Cette courbe a été développée par le mathématicien français Pierre Bézier dans les années 1960 pour la conception automobile chez Renault.

La courbe de Bézier est définie par un ensemble de points de contrôle qui déterminent la forme de la courbe. Les points de contrôle sont généralement placés sur les bords de la courbe et sont reliés par des segments de droite appelés "segments de contrôle". La courbe de Bézier suit alors une trajectoire douce et régulière à travers ces points de contrôle.

Les courbes de Bézier (Figure IV.5) peuvent être de différents ordres, c'est-à-dire qu'elles peuvent être définies par différents nombres de points de contrôle. Par exemple, une courbe de Bézier d'ordre 2 (ou courbe quadratique) est définie par trois points de contrôle, tandis qu'une courbe de Bézier d'ordre 3 (ou courbe cubique) est définie par quatre points de contrôle. Plus le nombre de points de contrôle est élevée, plus la courbe de Bézier est complexe et précise (Figure IV.6).

Pour $(p+1)$ points de contrôle ($p \geq 1$), on définit une courbe de Bézier de degré p comme suit :[30]

$$C(u) = \sum_{i=0}^p B_{i,p}(u)P_i$$

Où $B_{i,p}(u)$ est le ieme polynôme de Bernstein de degré p :

$$B_{i,p}(u) = \frac{p!}{i!(p-i)!} u^i (1-u)^{p-i} \quad u \in [0, 1]$$

Les propriétés principales des polynômes de Bernstein sont : [30]

- Stabilité, ce polynôme est une base optimale pour effectuer les principaux calculs.
- Valeurs des polynômes.

$$\begin{cases} B_{0,p}(0) = 1 \\ B_{p,p}(0) = 1 \end{cases} \quad \text{de plus :} \quad \begin{cases} B_{i,p}(0) = 0, \forall i \neq 0 \\ B_{i,p}(1) = 0, \forall i \neq n \end{cases}$$

- positivité : $B_{i,p}(u) \geq 0 \quad \forall u \in [0, 1]; B_{i,p}(u) > 0 \quad \forall u \in]0, 1[$
- symétrie : $B_{i,p}(u) = B_{p-i,p}(1-u), \quad \forall u \in [0, 1]$
- partition de l'unité : $\sum_{i=0}^p B_{i,p}(u) = 1, \quad \forall u \in [0, 1]$
- Relation de récurrence :

$$\begin{cases} B_{0,0}(u) = 1 \\ B_{i,p}(u) = 0 \text{ pour } i \notin \{0, K, n\} \\ B_{i,p}(u) = (1-u) B_{i,p-1}(u) + u B_{i-1,p-1}(u) \end{cases}$$

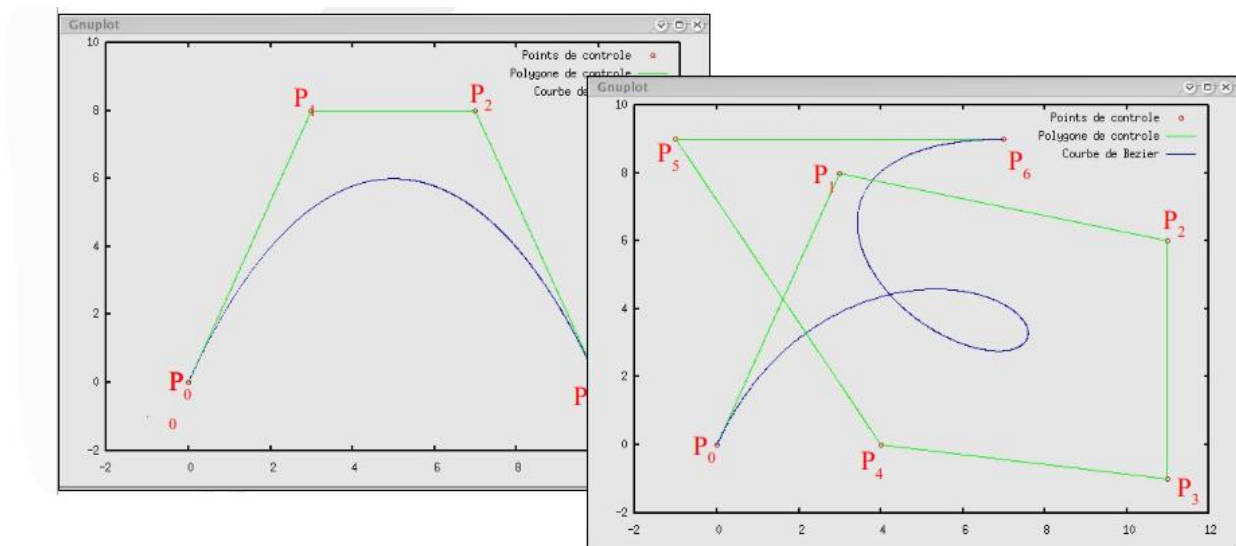


Figure IV.5: Exemple de courbe de Bézier [31]

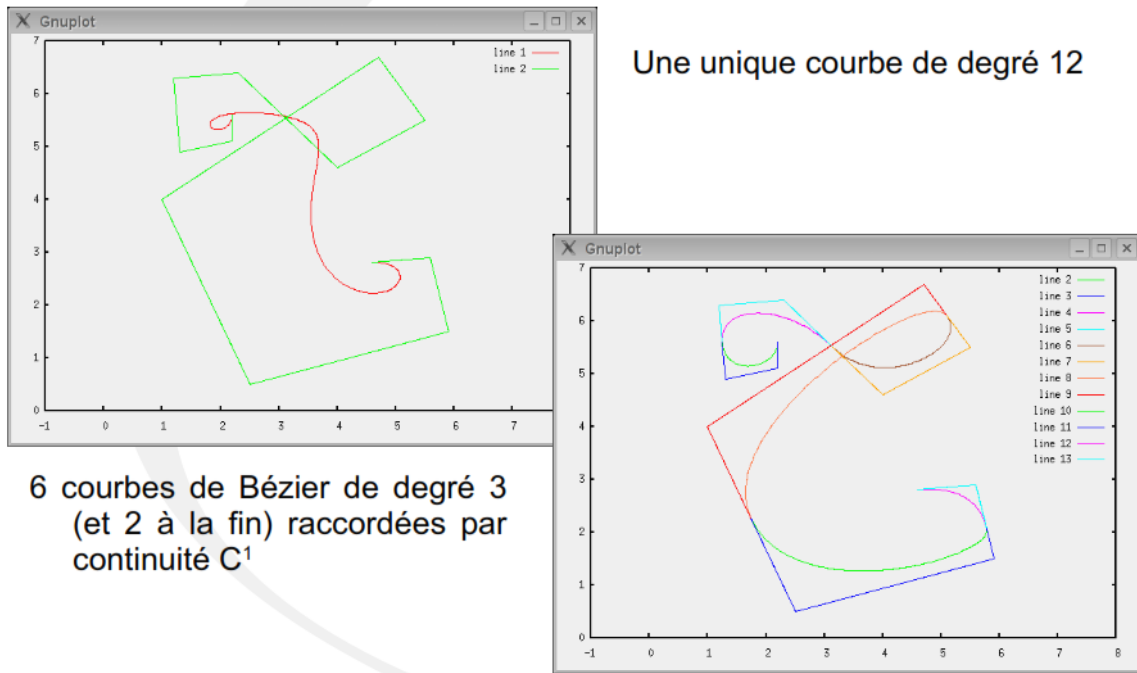


Figure IV.6: Exemple de modélisation de courbe complexe [31]

IV.3.1.2 Courbe B-Spline :

Les courbes B-Spline sont une autre famille de courbes mathématiques utilisées en infographie, en CAO et en modélisation géométrique. Les courbes B-Spline sont similaires aux courbes de Bézier en ce sens qu'elles sont définies par un ensemble de points de contrôle, mais elles offrent une plus grande flexibilité pour la création de formes courbes complexes (Figure IV.7).

Contrairement aux courbes de Bézier, qui sont des polynômes globaux, les courbes B-Spline sont définies localement. Cela signifie que chaque segment de la courbe est défini par un sous-ensemble de points de contrôle, plutôt que par tous les points de contrôle de la courbe. Les courbes B-Spline peuvent également être de différents ordres, allant de 1 à n , où n est le nombre de points de contrôle.

Chaque point de contrôle est associé à une fonction de base :

$$P(u) = \sum_{i=0}^n N_i^k(u) P_i \quad u_{min} \leq u < u_{max}$$

Il y a $n+1$ points de contrôle : P_0, P_1, \dots, P_n

Les N_i^k sont les fonctions de base d'ordre k et le degré de la courbe est $k-1$.

L'ordre k doit être choisi dans l'intervalle : $2 \leq k \leq n+1$

Une B-Spline est une fonction définie par morceaux

Il est nécessaire de définir un vecteur nodal composé de nœuds :

$$(u_0, u_1, \dots, u_{k+1}) \quad u_j \leq u_{j+1} \quad \forall j$$

Il détermine les valeurs de u pour lesquelles les fonctions de bases sont définies.

La courbe est alors définie pour u dans $[u_{k-1}, u_{n+1}]$.

Les fonctions de base N_i^k dépendent uniquement de la valeur de k et du vecteur nodal. Elles sont définies récursivement de la façon suivante (formule de Cox-de-Boor) : [31]

$$N_i^1(u) = \begin{cases} 1 & , \quad u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & , \quad \text{sinon} \end{cases}$$

$$N_i^k(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_i^{k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1}^{k-1}(u)$$

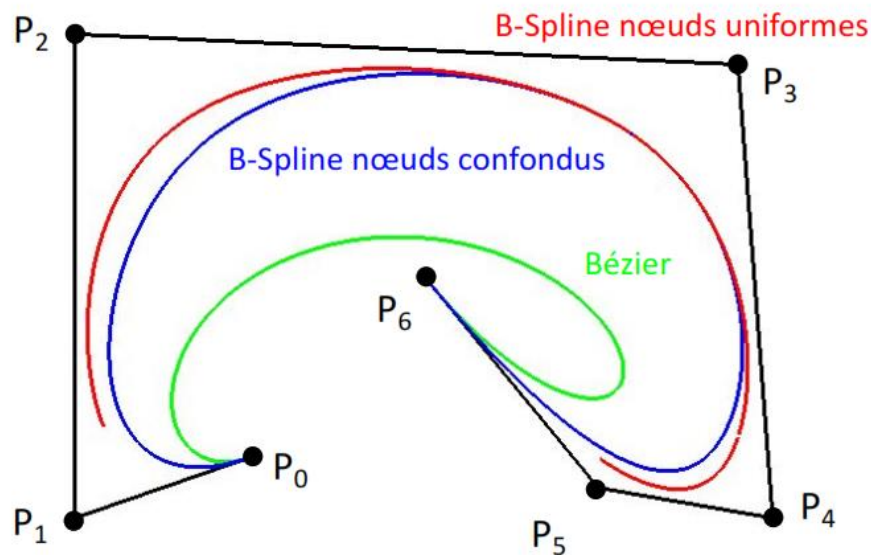


Figure IV.7: lien avec les Béziers [30]

IV.3.1.3 Courbe NURBS :

Les courbes NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) sont une extension des courbes B-Spline et sont encore plus flexibles pour la création de formes courbes complexes.

Comme les courbes B-Spline, les courbes NURBS sont définies localement et sont basées sur des segments de courbe qui sont définis par un ensemble de points de contrôle. Cependant, les courbes NURBS sont pondérées, ce qui signifie que chaque point de contrôle est affecté par un facteur de poids qui détermine l'influence de ce point sur la forme globale de la courbe. Les courbes NURBS peuvent également être de différents ordres, allant de 1 à n , où n est le nombre de points de contrôle.

Afin d'utiliser des fonctions de base rationnelles, l'équation d'une courbe NURBS est l'extension d'une courbe B-Spline dans l'espace euclidien R3 comme suit :

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} N_{i,p}(u)w_i P_i}{\sum_{i=0}^{m-1} N_{i,p}(u)w_i} \quad \text{avec} \quad u \in [0, 1]$$

Où les $\{P_i\}_{i=0\dots m-1}$ sont les points de contrôle, les w_i sont des poids réels positifs associés aux points de contrôle, et les $N_{i,p}(u)$ sont les fonctions de base B-Spline de degré p définies sur un vecteur de nœuds non-uniforme :

$$U = \underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, \underbrace{u_{p+1}, \dots, u_m}_{m-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1}$$

Si l'on écrit :

$$C(u) = \sum_{i=0}^{m-1} R_{i,p}(u)P_i$$

On peut réécrire la courbe sous la forme :

$$C(u) = \sum_{i=0}^{m-1} R_{i,p}(u)P_i$$

Où les $R_{i,p}(u)$ sont les fonctions de base rationnelles. Ce sont des fonctions rationnelles par morceaux sur $u \in [a, b]$. La classe des courbes rationnelles est capable de représenter des formes analytiques, comme les arcs, cylindres (Figure IV.8), coniques, quadratique, ... et les représentations polynomiales par des formes libres (Figure IV.9). [30]

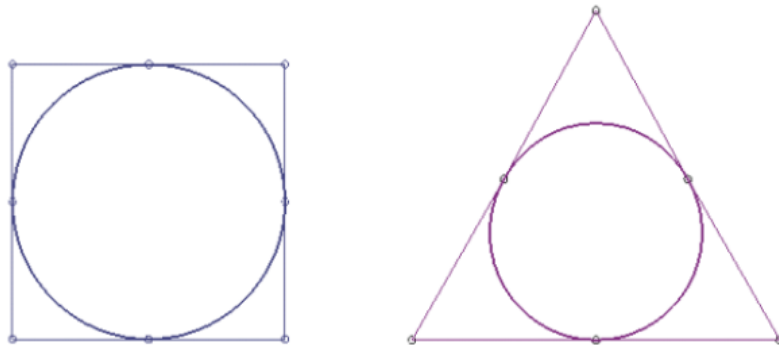


Figure IV.8: Représentation de cercles par des courbes NURBS.

Les propriétés des courbes NURBS peuvent être déduites des propriétés des courbes B-Spline et de la définition des fonctions $R_{i,p}(u)$

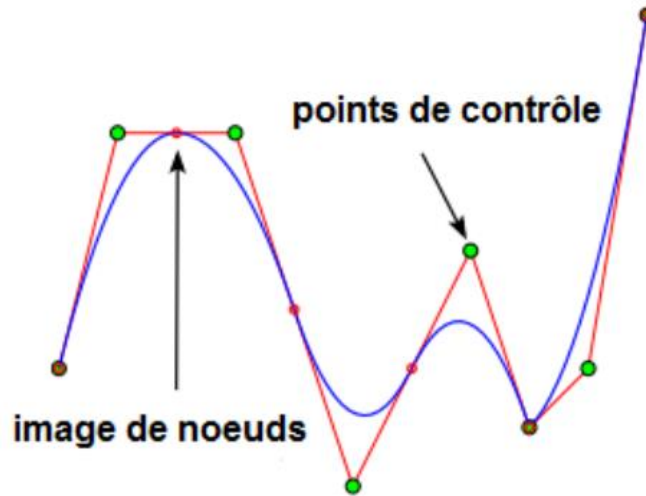


Figure IV.9: Exemple de courbe NURBS [32]

IV.3.2 Les surfaces paramétriques :

Une surface paramétrique polynômiale en (u, v) de degré n et m peut s'écrire:

$$Q(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} b_i(u) b_j(v)$$

Où $b_i(u)$ et $b_j(v)$ sont deux bases en u et v , et où $P_{i,j}$ sont $(n+1) * (m+1)$ points de contrôle.

Pour les mêmes raisons que dans le cas des courbes, on considérera des bases de degrés au moins égaux à 3.

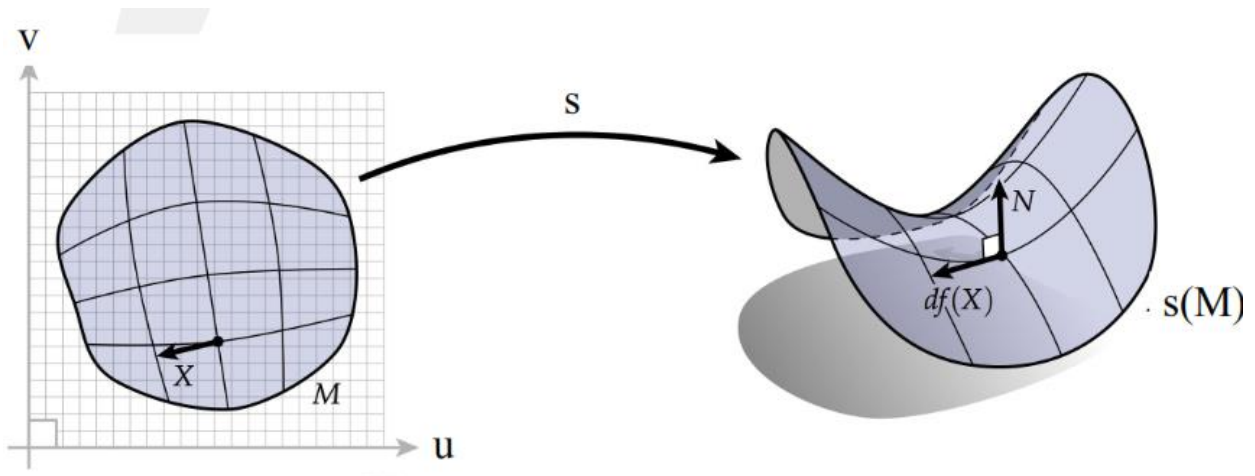


Figure IV.10: Surface paramétrique

IV.3.2.1 Surface de Bézier :

Les surfaces de Bézier sont créées à partir de plusieurs courbes de Bézier qui sont combinées pour former une surface. Chaque courbe est définie par un ensemble de points de contrôle, tout comme une courbe de Bézier 2D. Cependant, dans une surface de Bézier, chaque point de contrôle est en fait un point en 3D, donc les surfaces de Bézier sont définies dans un espace 3D.

Soit un ensemble de points de contrôle :

$$\begin{aligned} &P_{0,0}, P_{1,0}, P_{2,0}, \dots, P_{n,0} \\ &P_{0,1}, P_{1,1}, P_{2,1}, \dots, P_{n,1} \\ &P_{0,2}, P_{1,2}, P_{2,2}, \dots, P_{n,2} \\ &\dots \\ &P_{0,m}, P_{1,m}, P_{2,m}, \dots, P_{n,m} \end{aligned}$$

Disposés sur une grille de $n \times m$ sommets.

La surface de Bézier construite à partir de ces points est définie par :

$$Q(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} b_{i,n}(u) b_{j,m}(v)$$

Les fonctions de base $B_{i,n}(u)$ et $B_{j,m}(v)$ sont les polynômes de Bernstein.

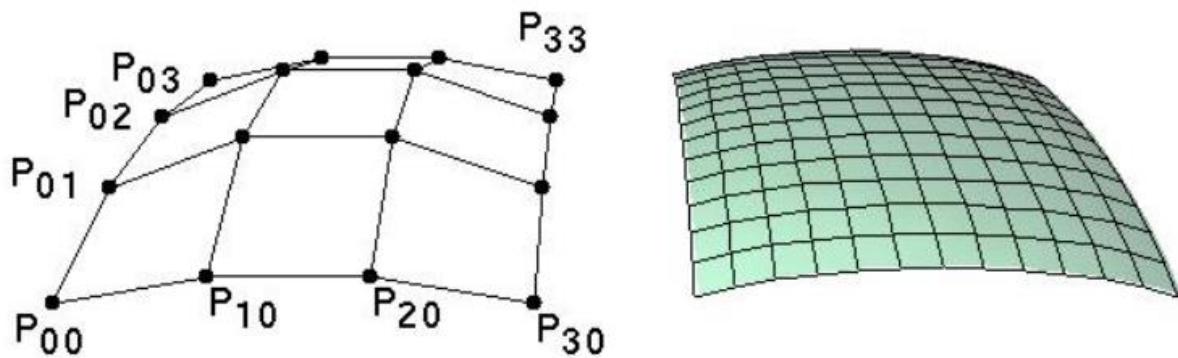


Figure IV.11: Exemple un patch cubique du troisième degré de Bézier construit sur $4 \times 4 = 16$ points de contrôle.

IV.3.2.2 Surface de B-spline :

Les surfaces B-Spline sont une méthode courante pour représenter des surfaces lisses et courbes en 3D dans les applications de CAO, de modélisation géométrique et de visualisation en informatique graphique. Tout comme les courbes B-Spline, les surfaces B-Spline sont basées sur des segments de courbe définis localement par un ensemble de points de contrôle et une fonction de base.

Soient $\{P_{i,j}\}_{i=0 \dots m-1, j=0 \dots n-1}$ les points de contrôle formant le polyèdre de contrôle,

Une surface B-Spline de degré p ($0 \leq p \leq m - 1$) et q ($0 \leq q \leq n - 1$) est définie comme :

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) P_{i,j} \quad \text{avec} \quad (u, v) \in [0, 1] \times [0, 1]$$

$N_{i,p}(u)$ et $N_{j,q}(v)$ sont les fonctions de base B-splines définies à partir des vecteurs de nœuds :

$$U = \underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, \underbrace{u_{p+1}, \dots, u_m}_{m-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1}$$

$$V = \underbrace{0, \dots, 0}_{q+1}, \underbrace{v_{q+1}, \dots, v_n}_{n-q-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{q+1}$$

Comme dans le cas d'une courbe B-spline, les surfaces B-splines sont la généralisation des surfaces de Bézier. Une surface de Bézier de degré (p, q) est définie par $(p + 1) \times (q + 1)$ points de contrôle $P_{i,j}$ ($i = 0 \dots p, j = 0 \dots q$) :

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^q B_{i,p}(u) B_{j,q}(v) P_{i,j} \quad \text{avec} \quad (u, v) \in [0, 1] \times [0, 1]$$

Où $B_{i,p}(u)$ et $B_{j,q}(v)$ sont les fonctions de base de Bézier. [30]

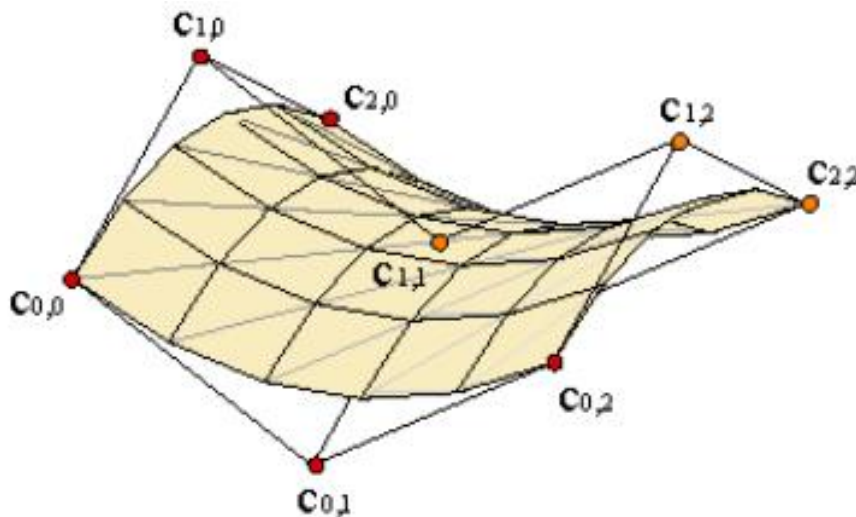


Figure IV.12: Exemple surface B-Spline avec 6×6 points de contrôle

IV.3.2.3 Surface NURBS :

Les surfaces NURBS sont basées sur les courbes B-Spline, mais elles permettent une distribution non uniforme des points de contrôle et sont pondérées, ce qui les rend plus flexibles et plus adaptées à la modélisation de surfaces courbes complexes.

Comme les courbes NURBS, les surfaces NURBS sont définies par un ensemble de points de contrôle qui sont utilisés pour créer une surface courbe. Cependant, contrairement aux surfaces de Bézier et B-Spline, les surfaces NURBS sont définies par une fonction de base rationnelle, qui permet une distribution non uniforme des points de contrôle et une pondération des points de contrôle.

En introduisant une coordonnée homogène supplémentaire pour chaque point de contrôle, on peut définir une surface NURBS (Non-Uniform Rational B-spline).

Soient $\{P_{i,j}\}_{i=0\dots p,j=0\dots q}$ les points de contrôle formant le polyèdre de contrôle. L'équation d'une surface NURBS de degré p ($0 \leq p \leq m - 1$) dans la direction du paramètre u et de degré q ($0 \leq q \leq n - 1$) dans la direction du paramètre v est de la forme suivante : [33]

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j}} \quad \text{avec} \quad (u, v) \in [0, 1] \times [0, 1]$$

où $w_{i,j} \mid w_{i,j} > 0, \forall (i, j) \in \mathbb{R}^2$ sont les poids de chacun des points $P_{i,j}$. $N_{i,p}(u)$ et les

$N_{j,q}(v)$ sont les fonctions de base B-splines définies à partir des vecteurs de nœuds :

$$U = \underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, \underbrace{u_{p+1}, \dots, u_m}_{m-p-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1}$$

$$V = \underbrace{0, \dots, 0}_{q+1}, \underbrace{v_{q+1}, \dots, v_n}_{n-q-1}, \underbrace{1, \dots, 1}_{q+1}$$

Posons :

$$R_{i,j}(u, v) = \frac{N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) w_{i,j}}{\sum_{k=0}^{m-1} \sum_{l=0}^{n-1} N_{k,p}(u) N_{l,q}(v) w_{k,l}}$$

La surface NURBS $S(u,v)$ peut se réécrire :

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} R_{i,j}(u, v) P_{i,j}$$

Où les $R_{i,j}(u)$ sont les fonctions de base rationnelles.

Les B-splines sont ainsi des NURBS pour lesquelles la coordonnée homogène de chacun des points de contrôle est 1.

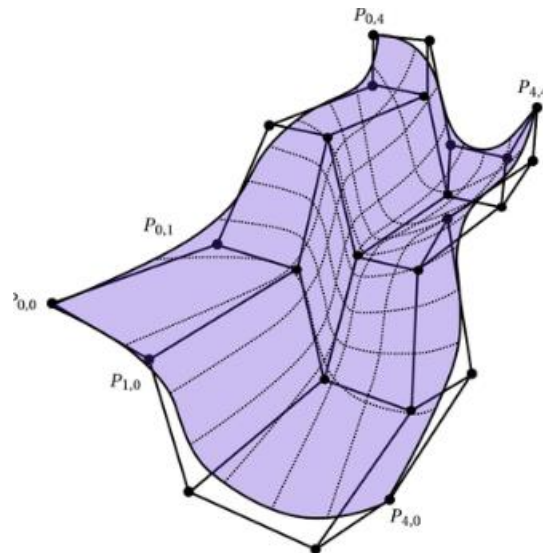


Figure IV.13: Surface NURBS définie par un réseau de contrôle.

IV.4 Reconstruction de surface

La reconstruction de surface est une tâche importante en vision par ordinateur qui consiste à créer une représentation tridimensionnelle (3D) d'un objet à partir d'un ensemble de données bidimensionnelles (2D). Les données d'entrée peuvent être des images, des nuages de points ou des mesures de profondeur.

IV.4.1 Méthodes de reconstruction

Quel que soit le type de méthodes utilise, un problème récurrent se pose : celui de la visualisation des surfaces, et de leur exploitation afin de servir de support à des calculs. On souhaite, en principe, construire une approximation affine par morceaux de celle-ci plus facile à manipuler, stocker, et exploiter dans des applications. Il existe plusieurs façons de procéder pour reconstruire une surface. On va citer quatre approches différentes. [34]

- Approches géométriques

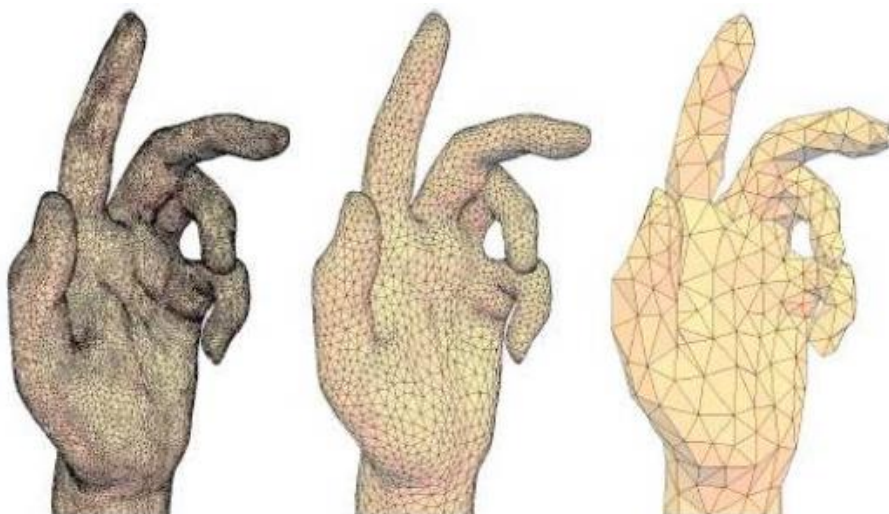


Figure IV.14: Exemple de reconstruction par la méthode de Delaunay pour différents nombres de points. [35]

- Approches avec contour actif

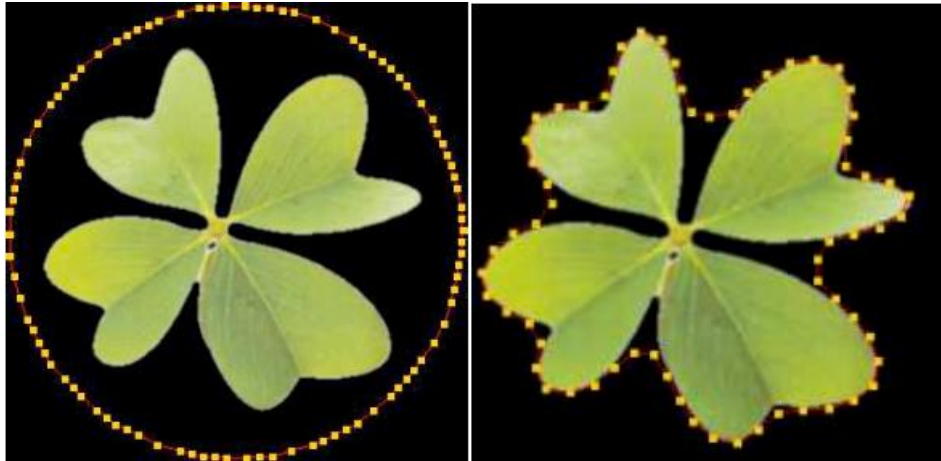


Figure IV.15: Exemple de reconstruction par la méthode des contours actifs [34]

- Approches continues avec résolution d'une équation aux dérivées partielles

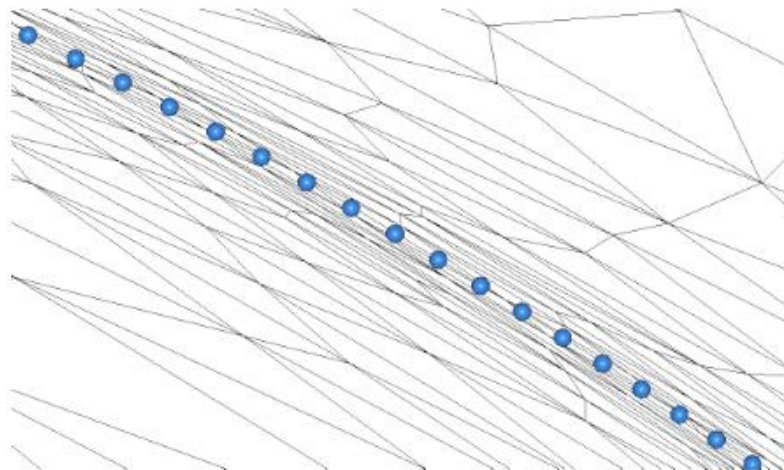


Figure IV.16: Exemple de maillage utilise, avec adaptation anisotrope autour des points de V.[34]

IV.4.2 Les Algorithmes de reconstruction de surface :

Il existe plusieurs algorithmes pour la reconstruction de surface à partir de données 2D. Les plus couramment utilisés sont les suivants :

1. Triangulation : cet algorithme consiste à relier les points voisins pour former des triangles, qui constituent ensuite la surface reconstruite. Cette méthode est simple et rapide, mais elle peut ne pas être très précise.
2. Marching Cubes : cet algorithme divise l'espace en petits cubes et utilise les valeurs de la fonction de distance pour reconstruire la surface. Cette méthode est plus précise que la triangulation, mais elle est également plus complexe et plus coûteuse en termes de temps de calcul.

3. Méthodes basées sur les patches : cette méthode utilise des patches de surface pour reconstruire la surface en 3D. Les patches sont des régions de la surface qui ont des propriétés de surface similaires. Cette méthode est plus robuste que la triangulation, mais elle peut être plus complexe et plus lente.
4. Modèles d'analyse en composantes principales (ACP) : cette méthode utilise une combinaison linéaire des coordonnées des points pour reconstruire la surface en 3D. Elle est utile lorsque les données ont une grande dimensionnalité et qu'il est difficile de les traiter avec d'autres méthodes.
5. Algorithmes de régularisation : ces algorithmes utilisent des contraintes pour limiter les variations de surface. Cette méthode est utile lorsque les données sont bruyantes ou incomplètes.

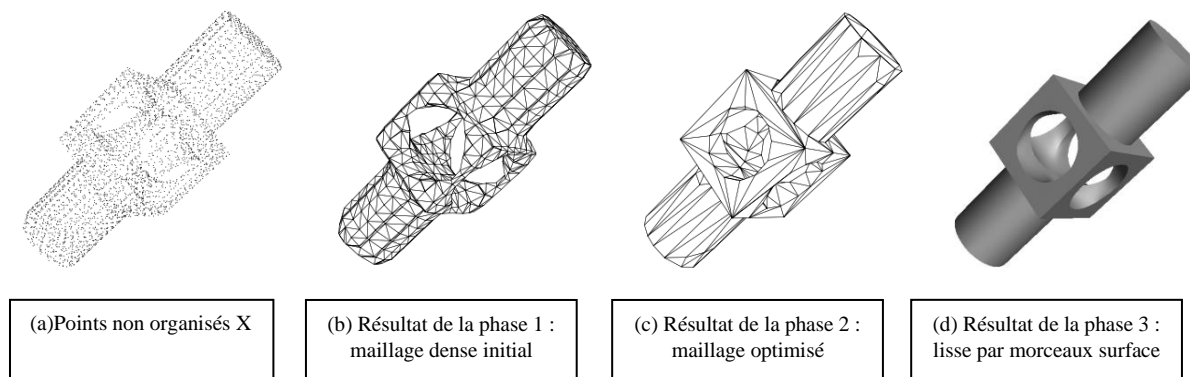


Figure IV.17: Exemple des trois phases de la méthode de reconstruction de surface. [35]

CHAPITRE V

Partie expérimentale (Rétroconception ailette turbine)

V.1. Introduction :

Les pièces nobles, également appelées pièces critiques, sont des composants importants et souvent coûteux des machines et des équipements, tels que les turbines. L'aube de turbine est l'un de ces composants, car elle joue un rôle clé dans la conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique dans une centrale électrique.

Dans le but de transformer un objet physique en modèle numérique. La rétro-conception des aubes de turbine peut être un processus complexe et coûteux, mais peut être utile pour garantir la disponibilité de pièces de rechange, pour améliorer les performances de la turbine ou pour résoudre des problèmes de maintenance.

Dans cette section expérimentale, nous allons utiliser les technologies les plus avancées telles que la numérisation 3D, les logiciels de traitement de nuages de points et le contrôle tridimensionnel par MMT pour effectuer une ingénierie inverse d'une ailette turbine fixe de la partie chaude, afin de garantir la précision de nos résultats.

V.2. Les turbine :

Les turbines (Figure V.1) sont des machines rotatives qui sont utilisées pour convertir l'énergie cinétique d'un fluide en mouvement en énergie mécanique, qui peut ensuite être utilisée pour produire de l'électricité ou d'autres formes d'énergie. Ces machines polyvalentes trouvent leur utilisation dans une vaste gamme d'applications, allant de la production électrique dans les centrales électriques, à la propulsion des navires et des avions, en passant par la génération de vapeur pour les industries, l'irrigation, et bien d'autres encore.

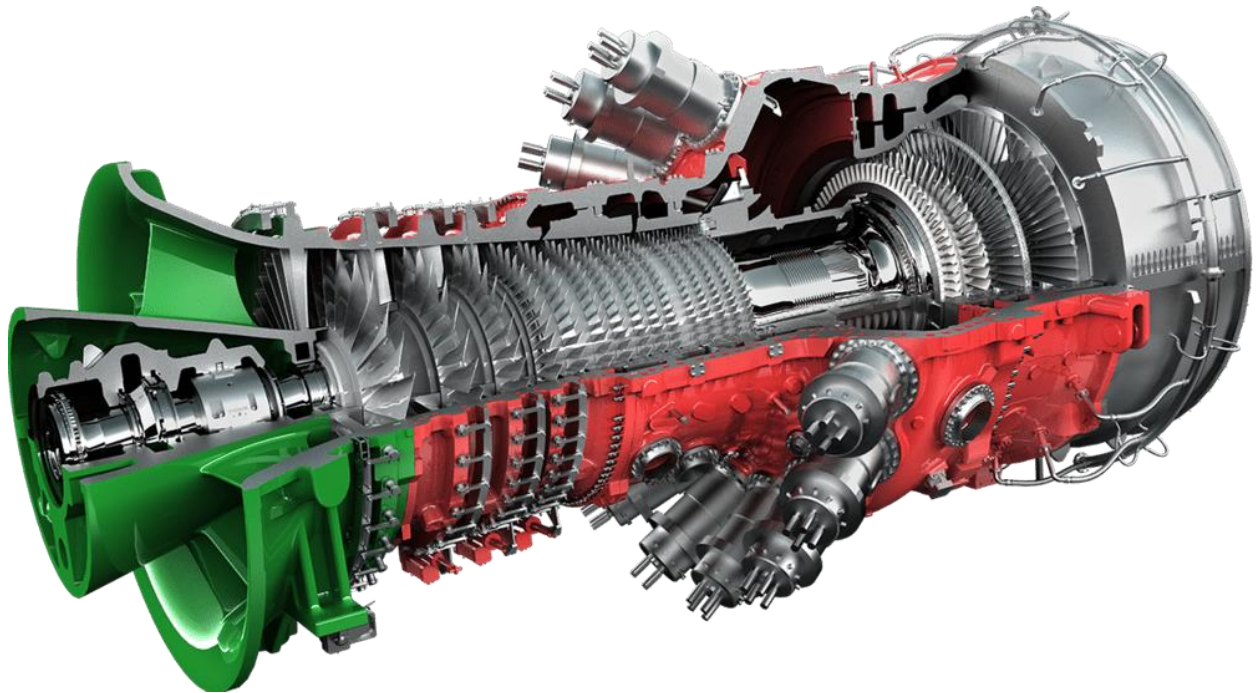


Figure V.1: Turbine à gaz

V.2.1. Les aubes de turbine :

L'aube de turbine (Figure V.2) est une pièce qui compose les roues de turbine, lesquelles sont entraînées par la force de l'eau ou de la vapeur pour produire de l'énergie électrique. Elle est généralement en acier, en titane ou en alliage de nickel, et doit être résistante à la corrosion, aux hautes températures et aux vibrations.

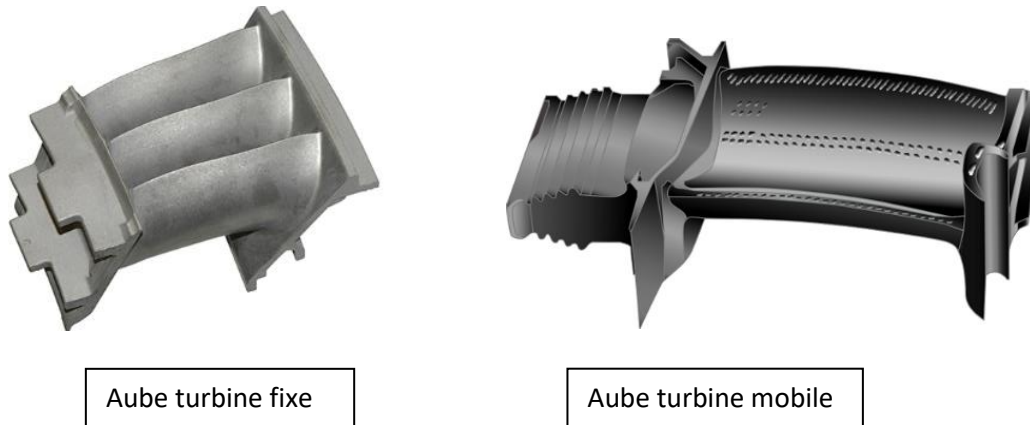


Figure V.2: Aubes turbine

V.2.2. Description de la pièce à étudier (ailette turbine fixe partie chaude) :

Une ailette de turbine fixe dans la partie chaude (directrices) d'une turbine à gaz fait référence à une rangée d'ailettes stationnaires situées dans la section de combustion de la turbine.

Ces ailettes sont conçues pour diriger le flux d'air chaud et de gaz de combustion qui provient de la chambre de combustion et qui entraîne la rotation des aubes mobiles de la turbine. Les ailettes fixes sont fixées dans la partie chaude de la turbine, juste en amont des aubes mobiles, et leur forme et leur angle sont soigneusement conçus pour maximiser l'efficacité de la turbine (Figure V.3).

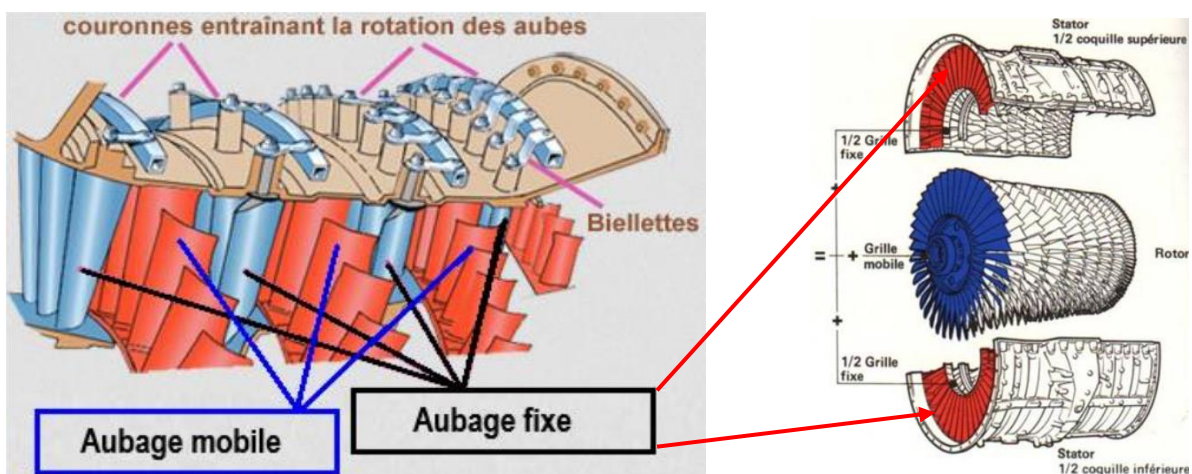


Figure V.3: Une partie d'un compresseur axial

Les ailettes fixes de la partie chaude sont souvent fabriquées à partir de matériaux résistants à la chaleur, tels que des alliages à base de nickel ou de cobalt, pour résister aux températures élevées des gaz de combustion. Elles peuvent également être recouvertes de matériaux céramiques pour améliorer leur résistance à l'usure et aux dommages.

Les ailettes de turbine fixes dans la partie chaude jouent un rôle crucial dans la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique dans les turbines à gaz, en aidant à diriger le flux de gaz de combustion et en maximisant l'efficacité de la turbine.

V.3. La pièce à étudier :

Au sein de cette section expérimentale, nous allons étudier une pièce à la forme complexe. Cette pièce est une ailette de turbine fixe (directrices), faisant partie du premier étage de la partie chaude d'une turbine à gaz.

La méthodologie adoptée pour cette étude consiste en la réalisation des étapes suivantes: numérisation 3D, traitement de nuages de points, reconstruction, vérification de la conformité, et création d'un prototype par impression 3D.



Figure V.4: la pièce à étudier (ailette turbine fixe partie chaude)

V.3.1. Equipements utilisés :

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

V.3.1.1. Scanner de lumière bleue 3D :

Scanner COMET L2D de STENIBICHLER lumière bleue (Figure V.5) est une technologie dotée d'une technologie d'éclairage LED innovante. Le nouveau capture ultra-portable rend l'acquisition de donnée 3D encore plus rapide, plus facile et plus précise.

Le scanner utilisé dans cette étude permet de capturer jusqu'à environ 2 millions de points de mesure en seulement 1,5 seconde. Les pièces comportant de nombreuses fonctionnalités peuvent être capturées beaucoup plus rapidement grâce à ce processus qu'en utilisant des systèmes tactiles conventionnels. De plus, il n'y a aucune limite de taille, et la précision est de 12 microns.



Figure V.5: Scanner COMET L2D de STENIBICHLER

V.3.1.1.1. Caractéristique :

Champs de mesure : 100, 200, 400 (mm)

Résolution du capteur : 2M

Espacement des points : à partir de 60 (μm)

Précision : à partir de 12(μm).

Logiciel : COMET plus version 9.7

V.3.1.1.2. Machine à mesure tridimensionnelle MMT :

La marque : Hexagon métrologie

Volume de mesure : (2x1.5x1) m

Précision : 1 μm

Logiciel : PC-DMIS CAD++

Commande : manuelle et automatique

V.3.1.1.3. Logiciel de traitement :

Geomagic design X version 2022

Geomagic contrôle X version 2022

V.3.2. Processus de travail :

Le schéma de la figure V.6 présente de manière explicative les différentes étapes suivies lors du processus de rétro-conception de notre pièce.

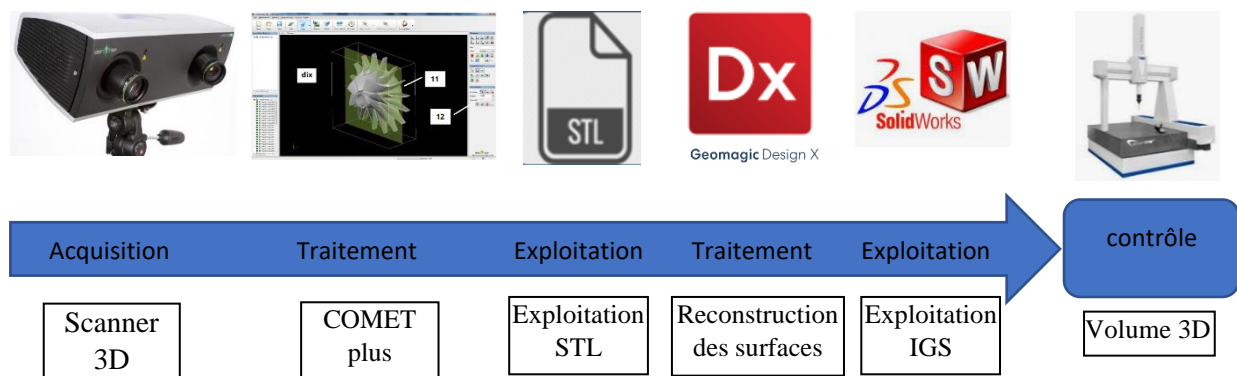


Figure V.6: Processus de travail

V.3.2.1. Phase de numérisation 3D :

La première étape consiste à préparer le stand de numérisation (Figure V.7) et la pièce à étudier en suivant les étapes suivantes :

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



Figure V.7: Préparation de l'endroit et de la pièce

- Opération de numérisation :

La table rotative double COMET (Figure V.8) est la solution parfaite pour nos besoins. Elle nous permet de mesurer des positions difficiles à atteindre sur des objets allant jusqu'à 20 kg.



Figure V.8: Table rotative double COMET

- Méthodologie suivie :

La méthodologie suivie est résumée dans l'algorithme de numérisation 3D, qui est présenté sous forme d'organigramme ci-dessous (Figure V.9).

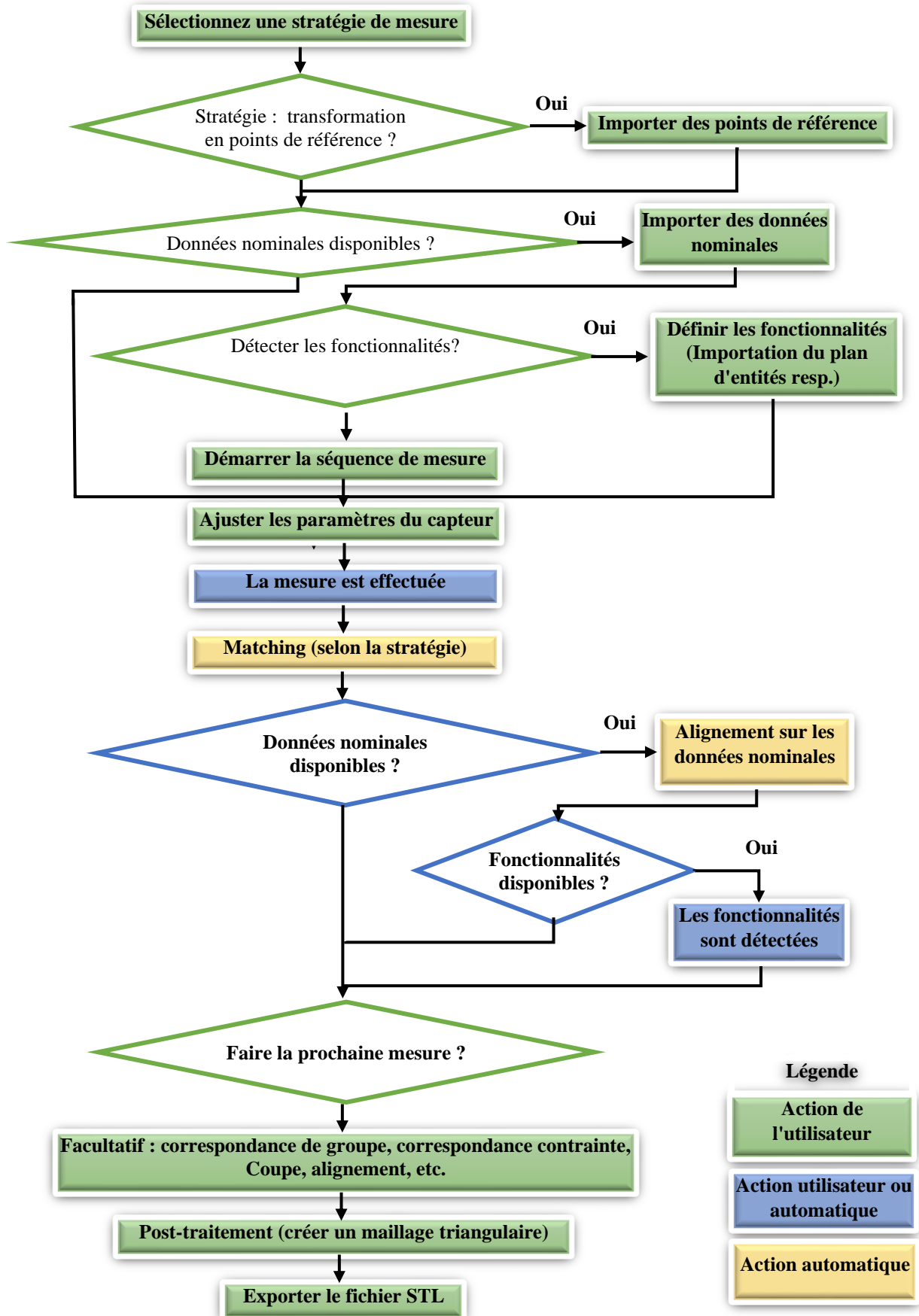


Figure V.9: Organigramme de la méthodologie suivie

V.3.2.2. Traitement avec COMET plus :

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

La formation de nuages de points est obtenue en suivant les étapes présentées dans la Figure V.10.

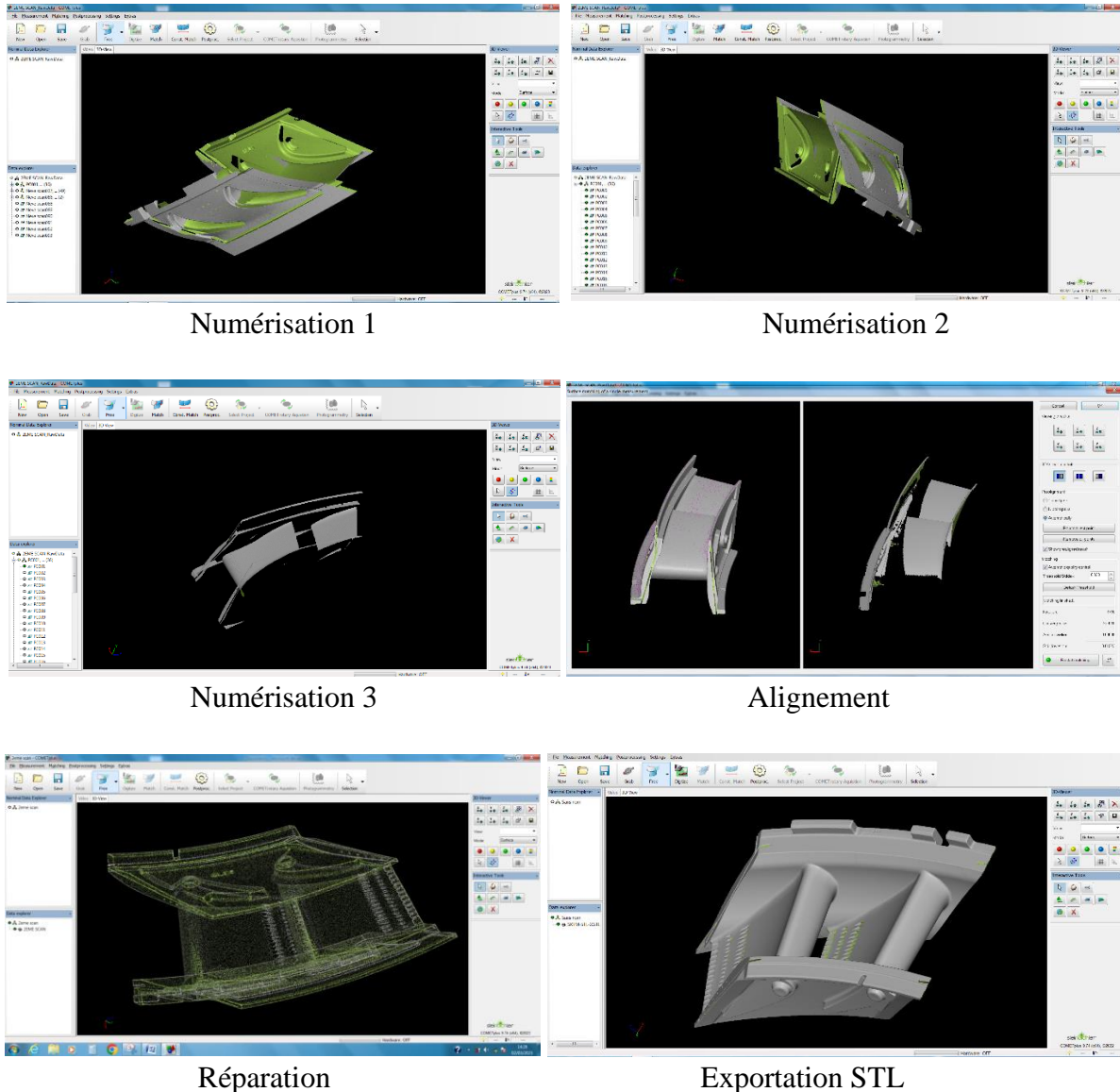


Figure V.10: Formation de nuages de points

V.3.2.3. Phase de traitements avec logiciel Geomagic design X :

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

- Méthodologie algorithme de travail GEOMAGIC Design X :

La méthodologie d'algorithme de travail Geomagic se concentre sur l'utilisation des outils et des fonctionnalités du logiciel pour optimiser le processus de modélisation 3D. Cette méthodologie commence par l'acquisition de données à l'aide d'un scanner 3D ou d'autres technologies de numérisation, puis utilise des outils Geomagic pour convertir ces données en modèles 3D. Les étapes suivantes incluent la création de surfaces, la réparation de modèles, l'ajout de fonctionnalités spécifiques et la préparation du modèle pour la production.

Pour une meilleure compréhension, nous avons résumé ce qui précède dans le graphique suivant :

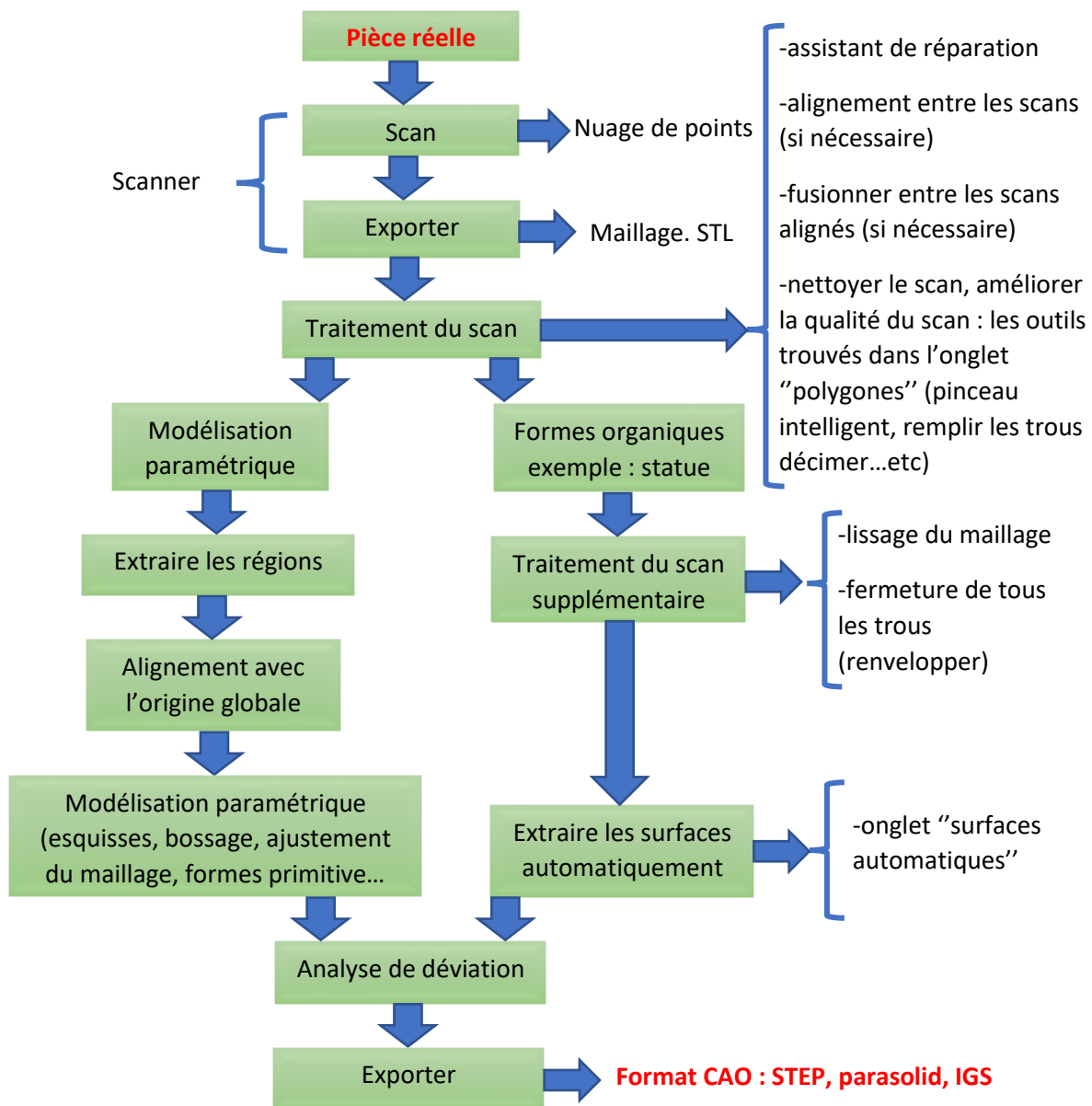


Figure V.11: Organigramme explicatif de la méthodologie de travail par GEOMAGIC

- Importation du nuage de points dans GEOMAGIC Design X :

La Figure V.12 illustre l'importation de nuage de points dans GEOMAGIC Design X sur format STL.

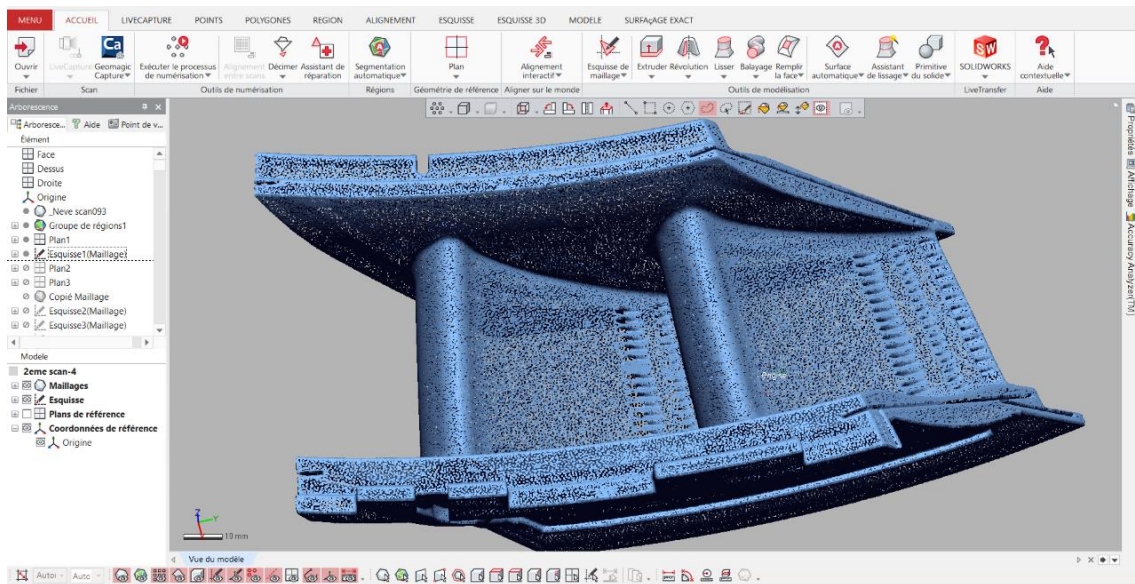


Figure V.12: Importation du nuage de points format STL dans Geomagic Design X

- Traitement du scan :

Selon GEOMAGIC Design X, la première étape est le traitement du scan trouvé dans l'onglet polygones (Figure V.13).

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

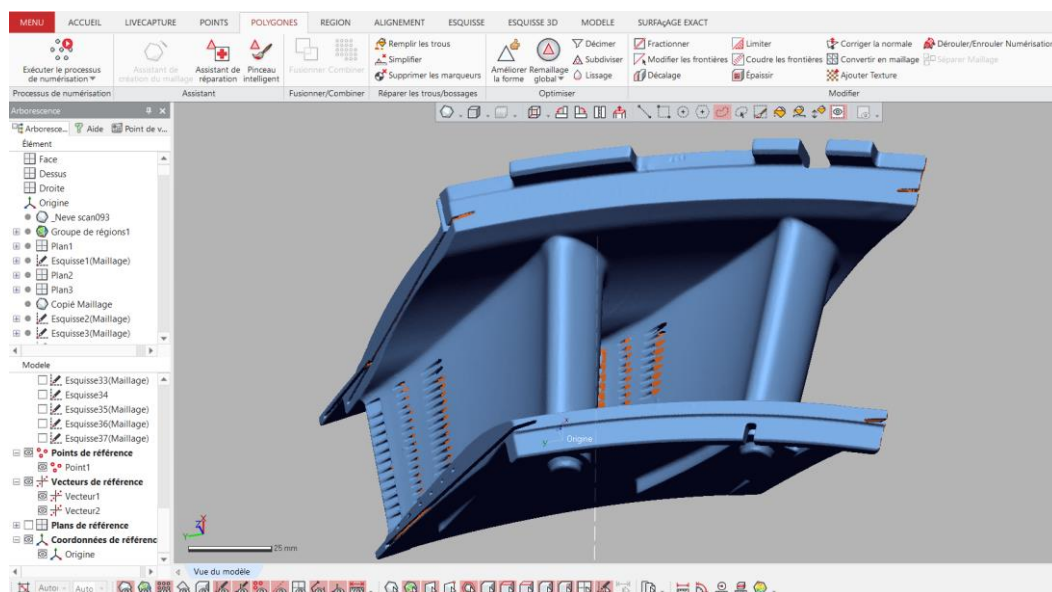


Figure V.13: Traitement du scan

- Reconstruction de la pièce :

Dans l'onglet région : extraire les régions par segmentation automatique (Figure V.14) cette technique peu détecté automatiquement les surfaces (cylindre, cône, plan...)

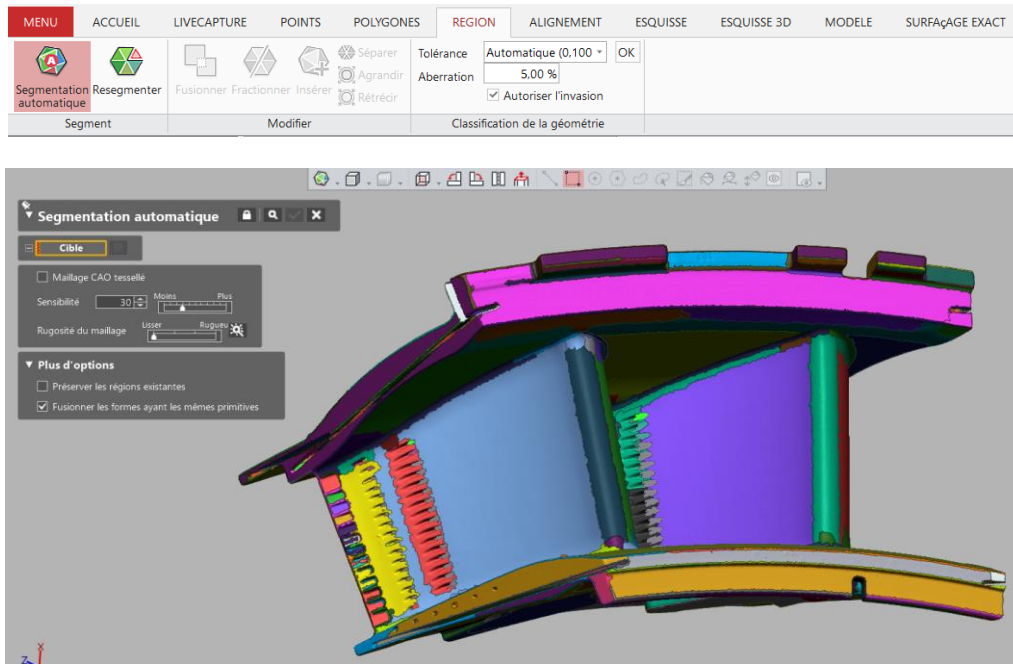


Figure V.14: Extraire les régions

Dans l'onglet alignement : alignement scan vers global, alignement interactif et choisir déplacement x-y-z pour crier un repère (Figure V.15).

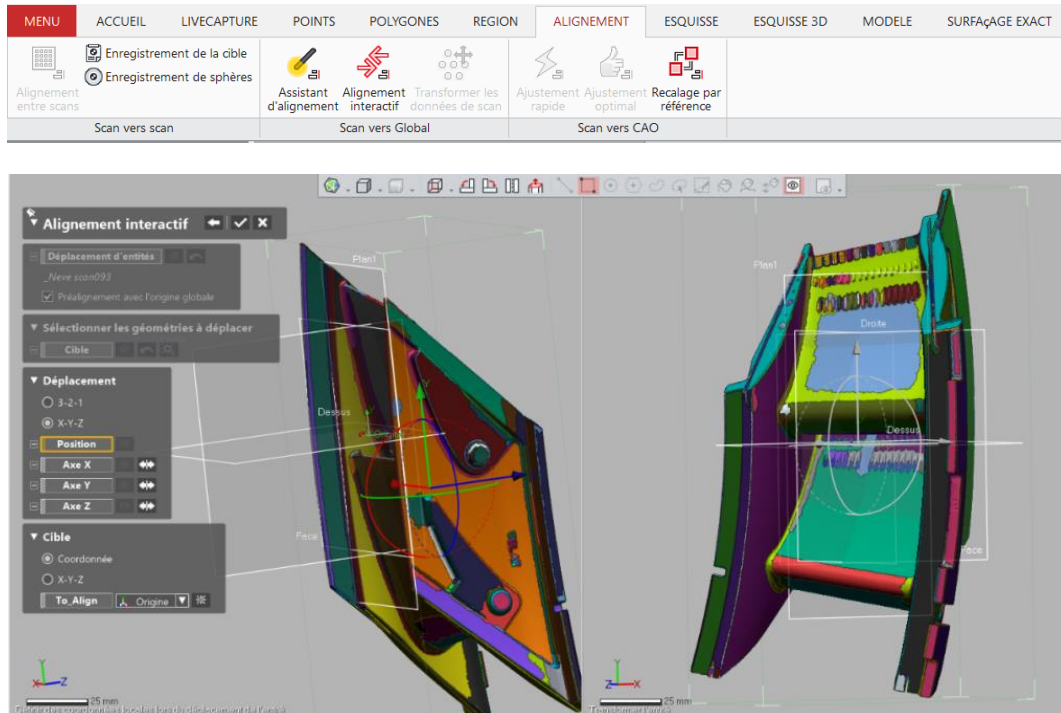


Figure V.15: Alignement interactif

Dans l'onglet modèle : ajustement sur maillage (détecté automatiquement les surfaces libres ou surfaces gauches) et construire les deux côtés, concave et convexe (Figure V.16).

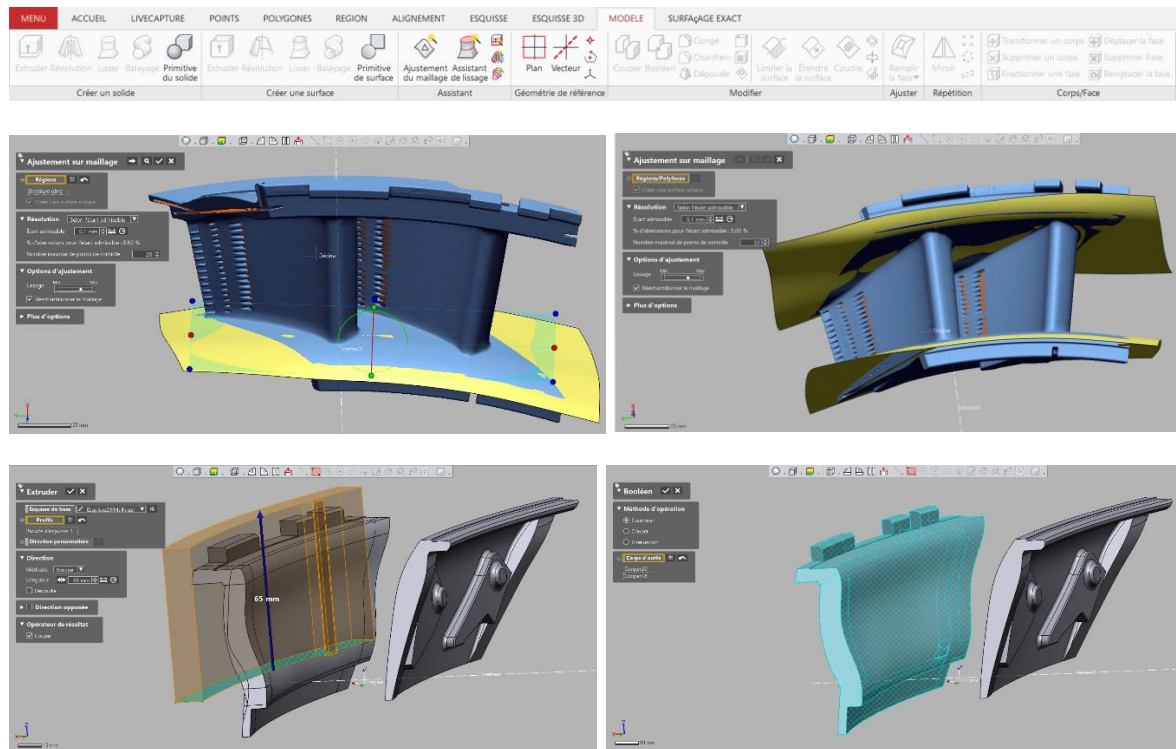


Figure V.16: Construction des deux côtés, concave et convexe

Dans l'onglet esquisse : Prenez une esquisse sur les pales (Figure V.17)

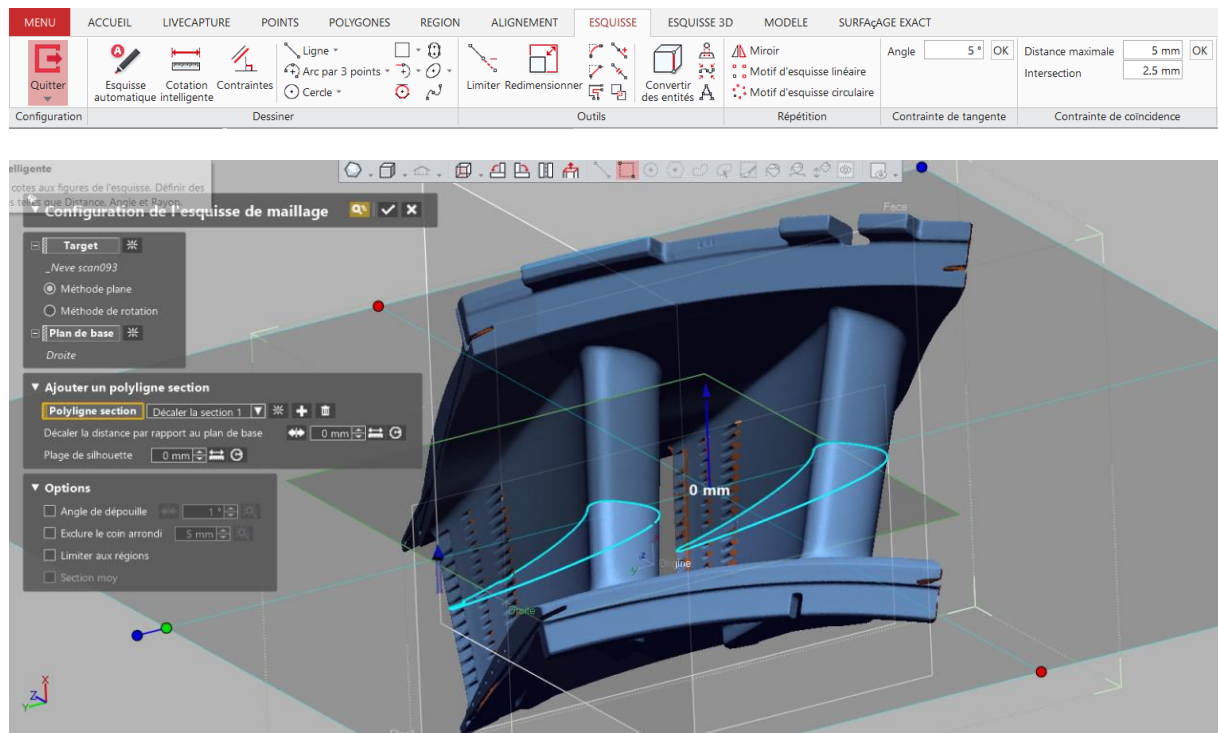


Figure V.17: Esquisse de maillage

Dans l'onglet modèle : lisser l'esquisse pour construire les pales (Figure V.18)

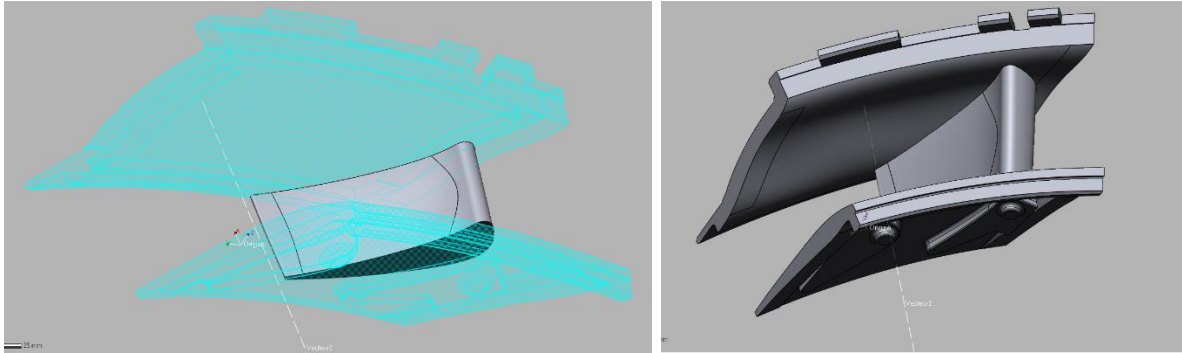
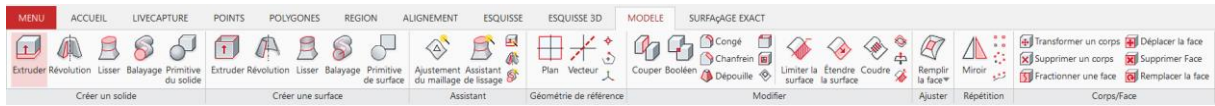


Figure V.18: Construire les pales

Pour le perçage : Esquisse sur maillage et enlèvement de la matière (Figure V.19).

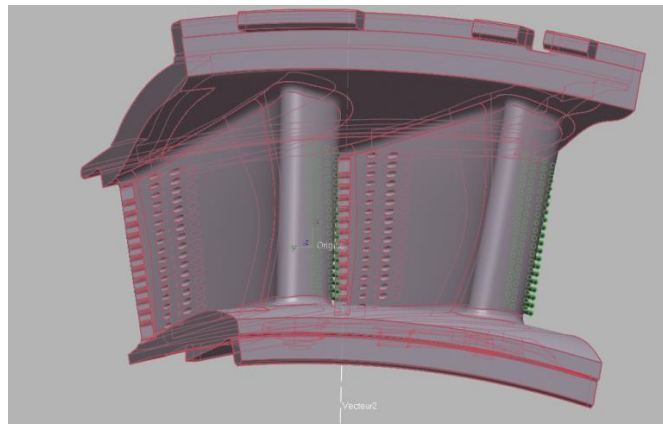


Figure V.19: Perçage des trous de refroidissement

La dernière étape de reconstruction est la réalisation des rainures sur les faces inclinées, les chanfreins et les congés (Figure V.20).

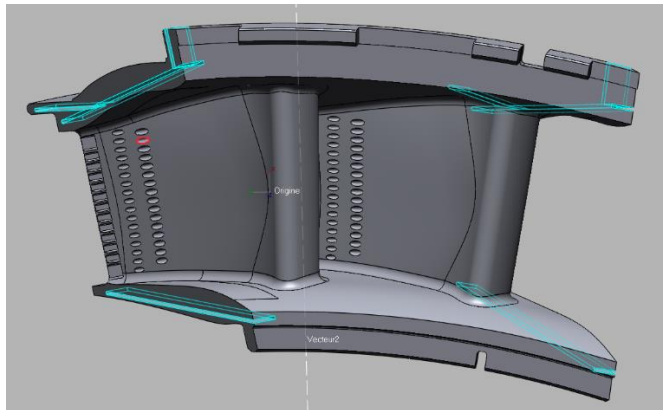


Figure V.20: Reconstruction des rainures par enlèvement de la matière

Finalement exporter le fichier format CAO (STEP, parasolid, IGS) comme le montre la Figure V.21

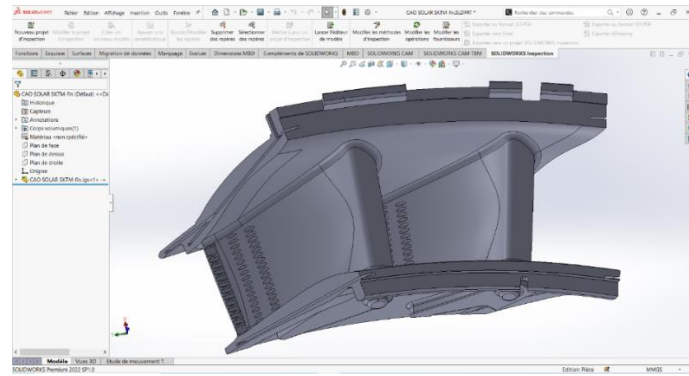


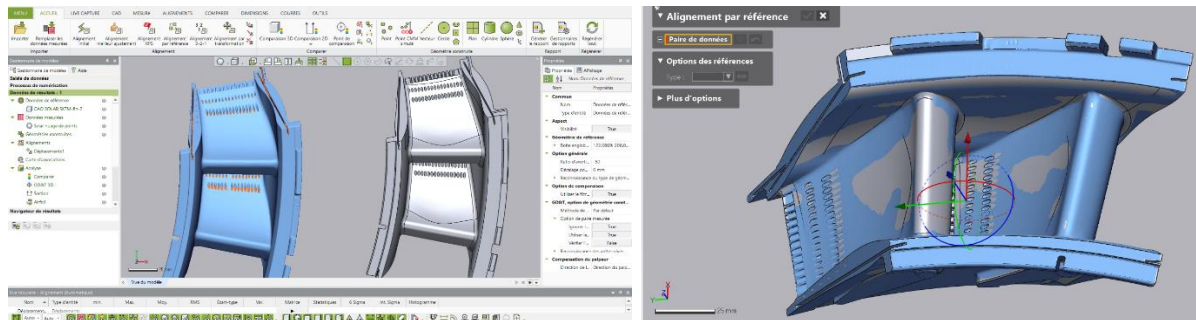
Figure V.21: Résultat finale de la réalisation du model CAO sur SolidWorks

V.3.3 Evaluation de la précision :

V.3.3.1 Analyse de déviation (nuage de points par rapport au CAO) :

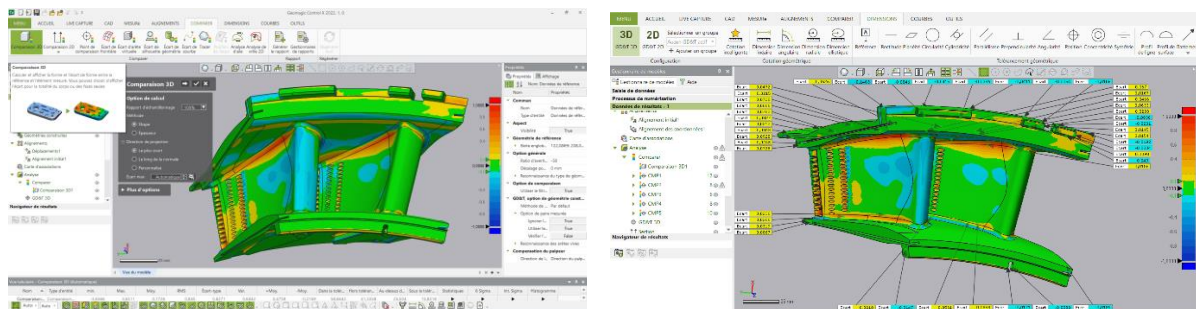
Le modèle de solide ou de surface est comparé aux données de scan sources. Cette comparaison peut être activée pendant une commande de modélisation ou en mode neutre. Cette commande peut être utilisée pour prendre des décisions de modélisation plus précises afin d'obtenir des résultats optimaux.

Le logiciel Geomagic Control X a été utilisé pour évaluer la précision (voir la Figure V.22).



Importation CAO – Nuage de points

Alignements



Comparaison 3D

Ecart CAO – Nuage de points

Figure V.22: Analyse de déviation

La comparaison est réalisée sur les surfaces de référence pertinentes afin d'assembler la pièce correctement dans la turbine. Les tolérances définies pour cette étude sont de ($\pm 0,1$ mm) pour les surfaces fonctionnelles et de ($\pm 0,3$ mm) pour les surfaces brutes.

V.3.3.1.1. Résultats et discussions :

Cette section fournit une analyse détaillée des résultats de l'alignement entre le modèle CAO et le nuage de points.

Pour plus de détails voir annexe (Rapport de contrôle)

Alignement sur les faces de références pour les axes (0.0005mm \rightarrow 0.006mm)

Nom	Nom du résultat	Tolérance d'angle	Δ Angle	Normale			Normale de paire		
				X	Y	Z	X	Y	Z
Plan1	Données de résultats - 1		0,283	0	0	-1	-0,0049	-0,0002	-1
Plan2	Données de résultats - 1		0,3884	0,2004	0,9797	0	0,1947	0,9809	0,0034
Plan3	Données de résultats - 1		0,6455	0,1936	0,9811	0	0,1908	0,9816	0,0109

Tableau V.1: Alignement CAO – nuage de points

Nom	min.	Max.	Moy.	RMS	Écart-type	Var.	+Moy.	-Moy.
CMP1	-0,311	0,0895	-0,0384	0,0989	0,0911	0,0083	0,058	-0,0881

Nom	Nom du résultat	Tolérance	Écart	Position de référence			Position Mesurée		
				X	Y	Z	X	Y	Z
CMP1: 1	Données de résultats - 1	$\pm 0,1$	-0,0692	424,2498	-113,9998	52	424,183	-113,9819	52
CMP1: 2	Données de résultats - 1	$\pm 0,1$	-0,0201	429,5578	-91,9999	52	429,5381	-91,9956	52
CMP1: 3	Données de résultats - 1	$\pm 0,1$	-0,0054	434,0046	-67,9999	52	433,9993	-67,9991	52
CMP1: 4	Données de résultats - 1	$\pm 0,1$	-0,0411	438,341	-29	51	438,3	-28,9972	51
CMP1: 5	Données de résultats - 1	$\pm 0,1$	-0,0415	439,2812	4	52	439,2397	3,9997	52
CMP1: 6	Données de résultats - 1	$\pm 0,1$	-0,1463	438,1324	32	51	437,9865	31,9895	51
CMP1: 7	Données de résultats - 1	$\pm 0,1$	0,0343	406,1044	82,9999	-7	406,138	83,0067	-7
CMP1: 8	Données de résultats - 1	$\pm 0,1$	0,0827	409,9866	60,9999	-5	410,0684	61,0123	-5
CMP1: 9	Données de résultats - 1	$\pm 0,1$	0,0666	412,7544	38	-6	412,8207	38,006	-6
CMP1: 10	Données de résultats - 1	$\pm 0,1$	0,0626	414,422	8	-6	414,4846	8,0012	-6
CMP1: 11	Données de résultats - 1	$\pm 0,1$	0,0472	413,7446	-25	-5	413,7917	-25,0028	-5
CMP1: 12	Données de résultats - 1	$\pm 0,1$	0,0466	411,4731	-50	-5	411,5194	-50,0055	-5

Tableau V.2: Données de résultats comparaison bondage côté concave

Nom	min.	Max.	Moy.	RMS	Écart-type	Var.	+Moy.	-Moy.
CMP2	-0,0926	0,0946	0,0033	0,0726	0,0725	0,0053	0,0766	-0,065

Nom	Nom du résultat	Tolérance	Ecart	Position de référence			Position Mesurée		
				X	Y	Z	X	Y	Z
CMP2: 1	Données de résultats - 1	±0,1	-0,049	422,811	-97,9999	56	422,8587	-98,0109	56
CMP2: 2	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0836	428,0055	-71,9999	56	428,088	-72,0138	56
CMP2: 3	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0386	433,4614	-22	56	433,5	-22,0019	56
CMP2: 4	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0846	434,0011	4	56	434,0857	4,0009	56
CMP2: 5	Données de résultats - 1	±0,1	0,067	410,7262	-15	-5	410,6593	-14,9977	-5
CMP2: 6	Données de résultats - 1	±0,1	0,0728	410,5125	20	-5	410,4399	19,9965	-5
CMP2: 7	Données de résultats - 1	±0,1	0,0782	407,9473	50	-5	407,8696	49,9906	-5
CMP2: 8	Données de résultats - 1	±0,1	0,0928	403,1382	79,9998	-5	403,0471	79,9817	-5

Tableau V.3: Données de résultats comparaison bondage côté convexe

Nom	min.	Max.	Moy.	RMS	Écart-type	Var.	+Moy.	-Moy.
CMP3	-0,0215	0,0241	0,0005	0,0141	0,0141	0,0002	0,0125	-0,0141

Nom	Nom du résultat	Tolérance	Ecart	Position de référence			Position Mesurée		
				X	Y	Z	X	Y	Z
CMP3: 1	Données de résultats - 1	±0,1	0,0145	429,2046	-80,7714	56,1928	429,2019	-80,7857	56,1928
CMP3: 2	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0106	429,8541	-80,9291	49,9585	429,856	-80,9188	49,9585
CMP3: 3	Données de résultats - 1	±0,1	0,0154	427,948	-89,371	50,8996	427,9512	-89,3559	50,8996
CMP3: 4	Données de résultats - 1	±0,1	0,0098	427,054	-89,1999	57,0542	427,056	-89,1903	57,0542
CMP3: 5	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0089	330,3182	-67,2059	56,645	330,3164	-67,2147	56,645
CMP3: 6	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0171	330,6766	-63,9522	56,9094	330,6799	-63,9355	56,9094

Tableau V.4: Données de résultats comparaison encoche côté concave et convexe

- En termes d'alignement, un alignement idéal a été obtenu, avec une précision maximale de 6µm (tableau V.1), ce qui permet une bonne comparaison de la pièce.
- Le tableau (V.2) présente les résultats de comparaison de la liaison côté concave, qui varie entre 20µm et 80µm, sans compter (comp1 :6) de 0.1463mm due à l'usure de la pièce. Les résultats obtenus sont dans la tolérance.
- Le tableau (V.3) présente les résultats de comparaison de la liaison côté convexe, qui sont presque identiques à ceux obtenus dans le tableau précédent (38µm à 92µm). Les résultats obtenus sont également dans la tolérance.
- Le tableau (V.4) présente les résultats de comparaison des encoches côté concave et convexe. Ces endroits sont importants car l'encoche côté convexe est utilisée pour installer la pièce à sa position dans la turbine, et l'encoche côté concave respecte la position du diaphragme côté rotor. Les résultats obtenus (8µm à 17µm) montrent une grande précision qui ne dépasse pas 17µm.

V.3.3.2 Contrôle du modèle CAO par apport à la pièce modèle sur MMT :

Pour effectuer une inspection sur la machine de mesure tridimensionnelle (MMT), il est nécessaire de disposer à la fois de la pièce à mesurer et du modèle 3D correspondant (Figure V.23).



Figure V.23: Emplacement de la pièce sur le marbre de la MMT

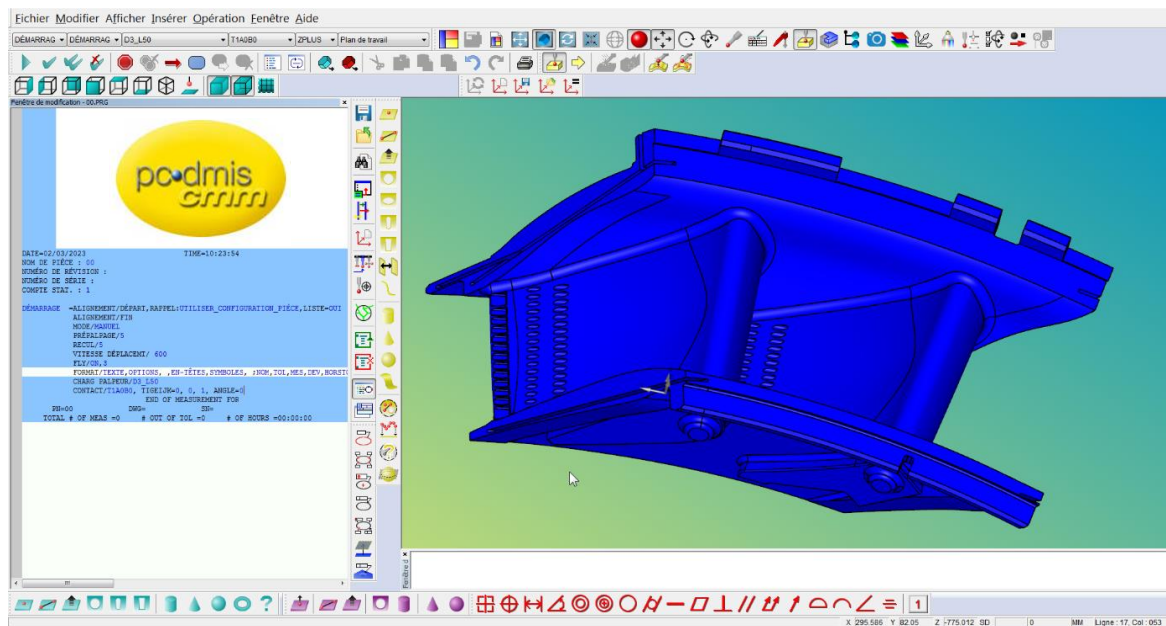


Figure V.24: Importation du model CAO sur logicielle PC-DMIS

Dans ce cas, un contrôle rapide sera effectué pour vérifier la précision du modèle 3D. Une tolérance de 0.1mm sera définie, et si elle est dépassée, le modèle sera corrigé. Les étapes suivantes sont nécessaires pour effectuer ce contrôle :

- Aligner la pièce en effectuant un alignement itératif à 0.02mm (Figure V.25).
- Contrôler la déviation sur les faces fonctionnelles (Figure V.26).

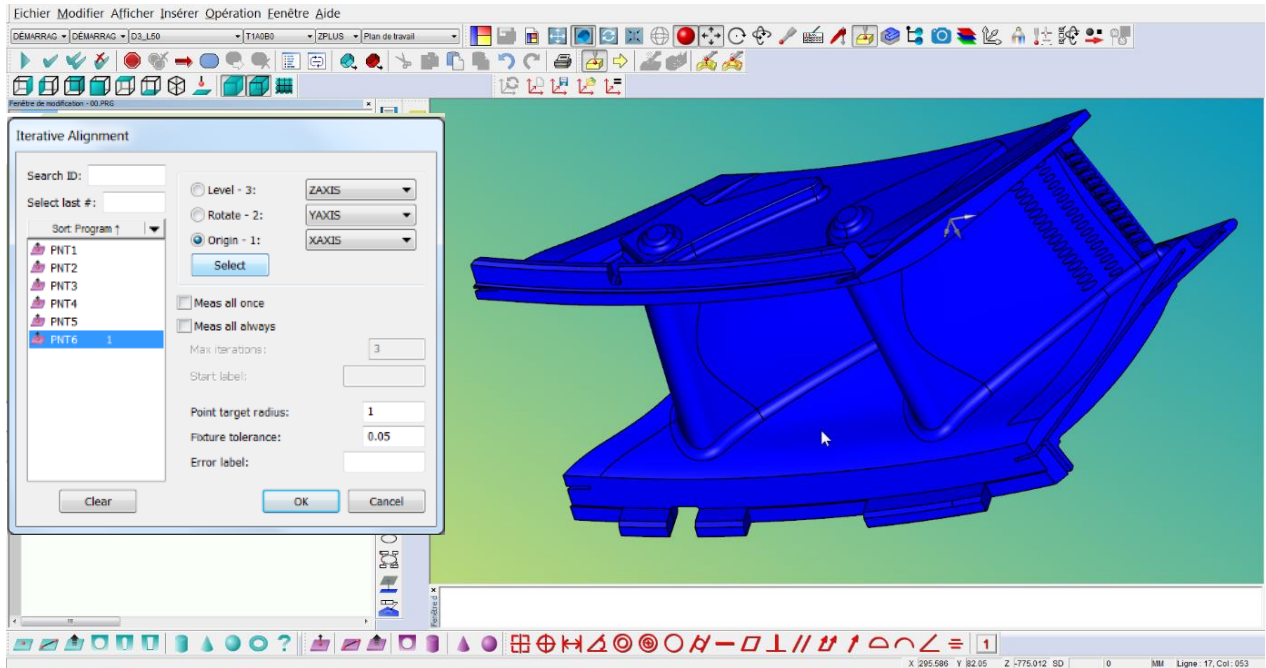


Figure V.25: Alignement itératif et le choix de 6 points sur CAO

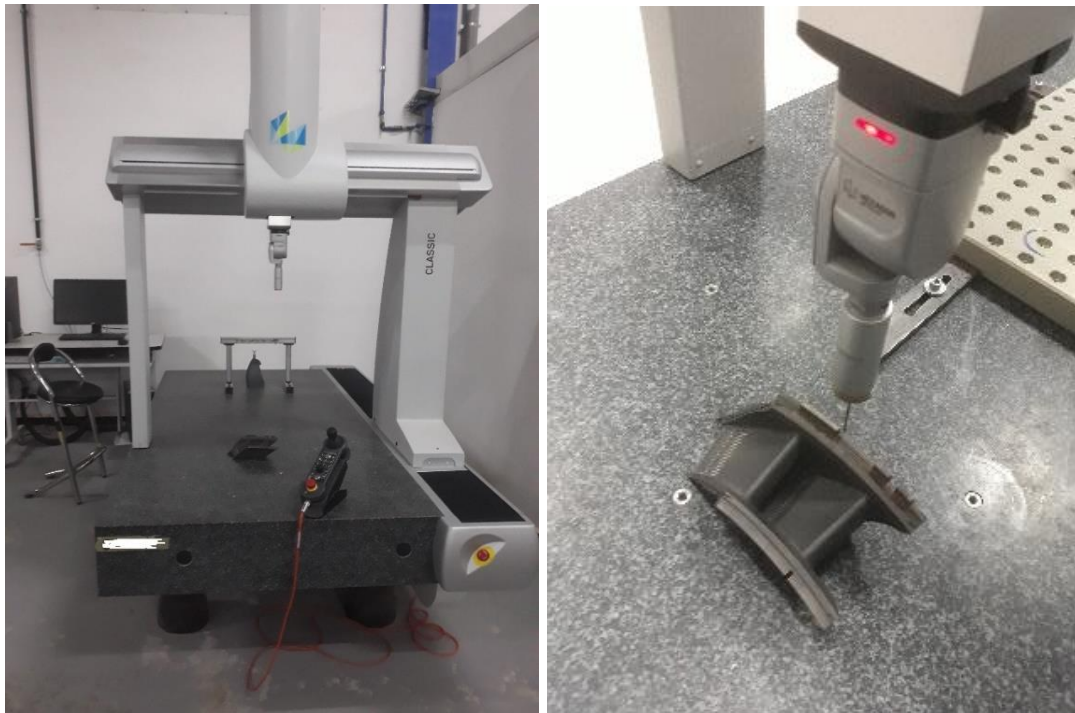


Figure V.26: Contrôle de la pièce

V.3.3.2.1. Résultats et discussions :

Les résultats obtenus se trouvent dans le tableau suivant :

	Côte nominale			Côte mesuré			Déviation		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Côté concave grande bondage extérieure	317,895	-103,428	56,438	317,864	-103,444	56,438	0,031	0,016	0,000
	330,406	-50,857	56,438	330,387	-50,877	56,438	0,019	0,020	0,000
	334,239	6,254	56,438	334,218	6,238	56,438	0,021	0,016	0,000
Côté convexe grande bondage extérieure	424,087	-114,605	51,353	423,904	-114,501	51,353	0,183	-0,104	0,000
	437,213	-42,767	51,353	437,186	-42,745	51,353	0,027	-0,022	0,000
	438,392	28,228	51,353	438,394	28,257	51,353	-0,002	-0,029	0,000
Côté convexe grande bondage intérieure	422,021	-101,349	55,235	422,059	-101,399	55,235	-0,038	0,050	0,000
	428,878	-66,612	55,235	428,899	-66,660	55,235	-0,021	0,048	0,000
	433,955	7,512	55,235	433,977	7,488	55,235	-0,022	0,025	0,000
Côté convexe petite bondage extérieure	406,429	81,399	-7,301	406,444	81,352	-7,301	-0,015	0,047	0,000
	414,338	11,580	-7,301	414,362	11,541	-7,301	-0,024	0,039	0,000
	411,428	-50,375	-7,301	411,450	-50,371	-7,301	-0,022	-0,004	0,000
Côté convexe petite bondage intérieure	402,604	82,652	-7,301	402,592	82,666	-7,301	0,012	-0,014	0,000
	410,822	12,091	-7,301	410,843	12,034	-7,301	-0,021	0,057	0,000
	407,802	-51,169	-7,301	407,755	-51,153	-7,301	0,047	-0,016	0,000
Encoche concave	329,732	-67,090	56,400	329,746	-67,142	56,400	-0,014	0,052	0,000
	330,906	-63,998	56,400	330,874	-64,035	56,400	0,032	0,038	0,000
	333,877	-66,251	56,400	333,867	-66,231	56,400	0,010	-0,020	0,000
Encoche convexe	427,637	-89,319	56,101	427,628	-89,321	56,101	0,009	0,002	0,000
	429,459	-80,821	56,101	429,450	-80,840	56,101	0,009	0,019	0,000
	425,000	-83,674	50,818	424,970	-83,678	50,827	0,030	0,004	-0,009

Tableau V.5: Résultat obtenus par mesure sur MMT

Les mesures effectuées sur les faces fonctionnelles de la pièce ont révélé une déviation allant de 9µm à 52µm, avec la valeur la plus élevée observée sur la ligne correspondant au côté convexe avec un grand bondage extérieur. Cette déviation est attribuable à l'usure de la pièce, mais malgré cela, notre modèle 3D est considéré comme acceptable. Toutefois, si les résultats avaient été insatisfaisants, des modifications seraient apportées au modèle CAO.

V.4. Conclusions :

La rétro-conception des aubes de turbine est une méthode complexe et coûteuse, mais elle est très bénéfique pour garantir la disponibilité de pièces de rechange, améliorer les performances de la turbine ou résoudre des problèmes de maintenance. Dans cette étude, une approche de rétro-conception pour des pièces de formes complexes a été développée et appliquée en utilisant les technologies de numérisation 3D les plus avancées ainsi que la machine de mesure tridimensionnelle MMT pour valider l'approche proposée. Après les étapes de numérisation, de traitement de nuages de points, de reconstruction du modèle CAO, d'alignement et de recalage, ainsi que d'analyse des résidus, les résultats obtenus ont démontré une grande précision permettant de traiter avec succès toute pièce complexe, quel que soit son niveau de précision.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons réalisé la transformation d'un objet physique en modèle numérique. Notre étude s'est concentrée sur des pièces de forme complexe, en particulier la rétroconception d'une ailette fixe de la partie chaude du premier étage d'une turbine à gaz. Pour ce faire, nous avons tiré parti des avancées dans le domaine de l'acquisition de données tridimensionnelles, que ce soit par le biais de scanners 3D pour la numérisation à distance ou de machines de mesure tridimensionnelle (MMT) pour le contrôle du modèle CAO.

La méthodologie que nous avons proposée repose principalement sur notre expérience personnelle dans la conception, la fabrication assistée par ordinateur et le contrôle qualité par le biais de MMT, de bras de mesure et de scanners 3D dans le domaine des turbines à gaz et à vapeur. Notre travail s'est déroulé en quatre étapes :

1. Numérisation à l'aide d'un scanner 3D à lumière bleue structurée pour obtenir un fichier au format STL.
2. Traitement du nuage de points à l'aide des logiciels COMET plus et Geomagic Design X.
3. Reconstruction du modèle à l'aide du logiciel Geomagic Design X.
4. Évaluation de la précision à l'aide du logiciel Geomagic Control X et de la MMT.

L'ailette de turbine que nous avons rétroconçue fait partie des composants essentiels et sa disponibilité est cruciale pour l'État, qui les importe en grande quantité à des prix exorbitants. En réalisant cette rétro-ingénierie, nous avons fourni une contribution essentielle pour pénétrer dans le monde de l'industrie de précision, non seulement dans le domaine de l'énergie, mais également dans tous les secteurs nécessitant des modèles en trois dimensions. Cette approche nous a permis d'économiser des efforts, de l'argent et du temps.

La possession d'une version numérique d'un objet réel offre également la possibilité d'apporter des améliorations sans coûts supplémentaires. Ces améliorations peuvent concerner des modifications de la géométrie de l'objet ou le choix d'un matériau de meilleure qualité. Sans aucun doute, la technique présentée constitue une excellente approche pour la reconstruction d'éléments existants.

Dans le cadre de cette étude, nous avons donc réalisé une analyse de déviation entre le nuage de points et le modèle CAO de l'ailette fixe, en mettant également l'accent sur les encoches situées du côté concave et convexe de la pièce. Ces emplacements revêtent une grande importance, car l'encoche côté convexe est utilisée pour l'installation précise de la pièce dans la turbine, tandis que l'encoche côté concave respecte la position du diaphragme côté rotor.

Les résultats obtenus pour ces encoches ont révélé une grande précision, avec des déviations ne dépassant pas $17 \mu\text{m}$ et atteignant même une précision maximale de $8 \mu\text{m}$. Cette précision remarquable démontre notre capacité à garantir un ajustement précis et fiable de la pièce dans la turbine, tout en maintenant l'intégrité et la position correcte du diaphragme côté rotor.

En outre, grâce à l'alignement idéal que nous avons obtenu avec une précision maximale de 6 μm , nous avons pu réaliser une comparaison approfondie entre la pièce rétroconçue et le modèle CAO, assurant ainsi une évaluation précise de la conformité de la pièce aux spécifications requises.

Ces résultats témoignent de la fiabilité et de la précision de notre approche de rétroconception, et soulignent son importance dans le domaine de la fabrication et de la maintenance des pièces de formes complexes, en particulier dans le contexte des turbines.

Par ailleurs, lors de l'analyse des mesures réalisées par MMT sur les faces fonctionnelles de la pièce, nous avons constaté une déviation allant de 9 μm à 52 μm . La déviation maximale a été observée sur la ligne correspondant au côté convexe avec un grand bondage extérieur. Cette variation est principalement due à l'usure de la pièce. Cependant, même avec cette déviation, notre modèle 3D est considéré comme satisfaisant et conforme aux exigences.

Il est important de souligner que notre approche de rétroconception est axée sur l'amélioration continue. Si les résultats des mesures avaient été insatisfaisants, des ajustements et des modifications auraient été apportés au modèle CAO afin de mieux correspondre aux mesures réelles. Cette flexibilité nous permet d'optimiser la précision et la qualité du modèle numérique, garantissant ainsi une meilleure adéquation avec la réalité.

Malgré la déviation observée, notre modèle 3D reste fonctionnel et offre une représentation acceptable de la pièce étudiée. Il est essentiel de prendre en compte les conditions d'usure et de vieillissement des composants lors de l'évaluation des résultats de mesure. Cette compréhension nous permet d'apprécier les performances du modèle dans des conditions réelles d'utilisation.

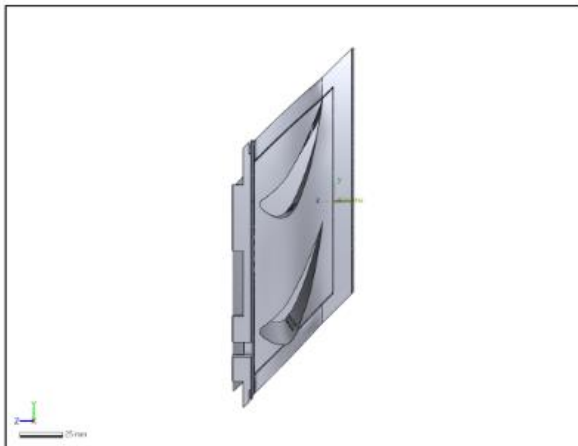
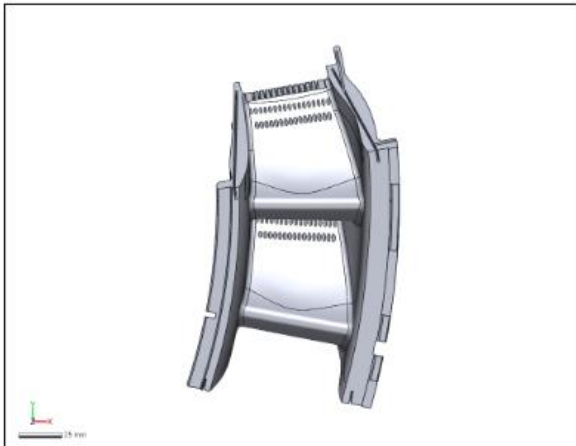
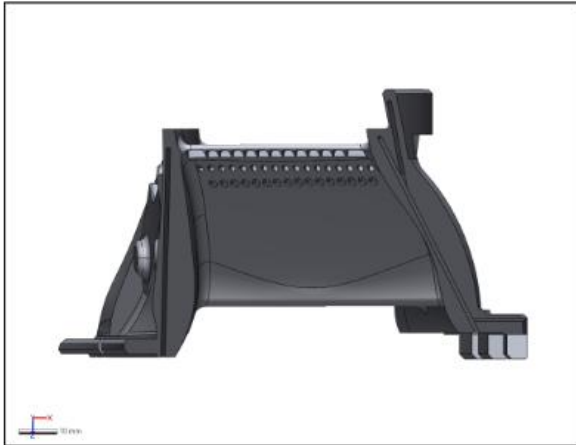
La capacité d'ajuster et de mettre à jour le modèle numérique en fonction des mesures réelles constitue un avantage majeur de la rétroconception. Cela nous permet d'apporter des améliorations continues et d'optimiser la conformité de la pièce aux spécifications requises.

Finalement, malgré la déviation observée sur les faces fonctionnelles de la pièce, notre modèle 3D est jugé acceptable et fonctionnel. La rétroconception offre la possibilité d'apporter des modifications au modèle CAO si nécessaire, ce qui garantit une meilleure adéquation avec les mesures réelles et les exigences spécifiques. Cela renforce la fiabilité et l'efficacité de notre approche de rétroconception dans le domaine des pièces de formes complexes.

Annexe

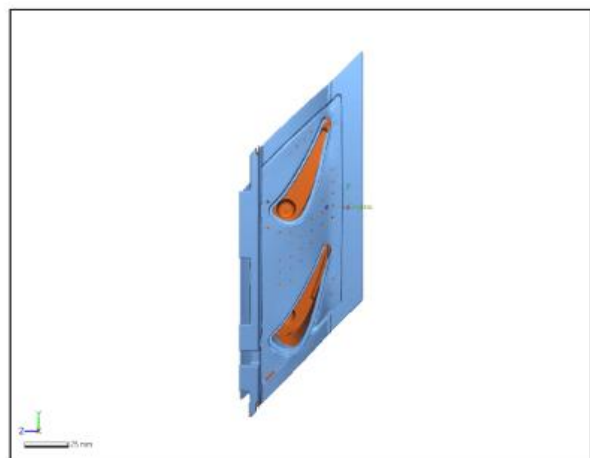
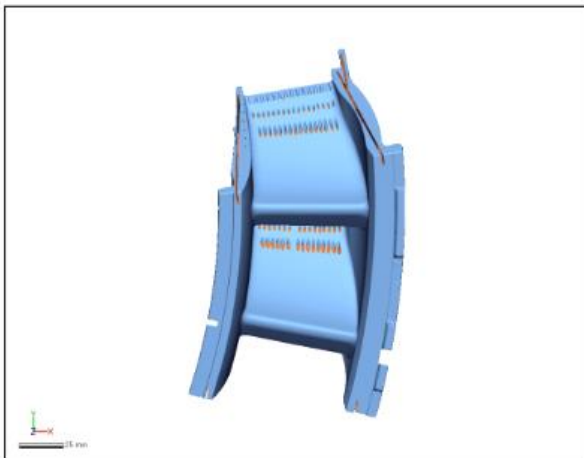
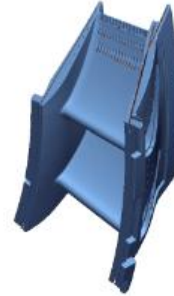
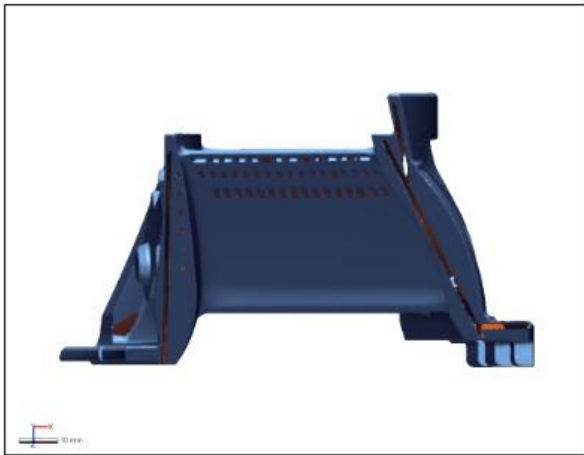
Rapport de contrôle :

Données de résultats - 1 : Données de référence - CAO ailette fixe



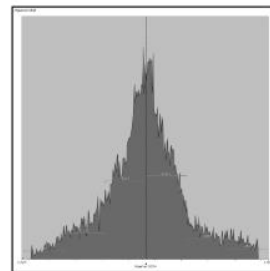
Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Données de résultats - 1 : Données mesurées - Nuage de points ailette fixe



Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Données de résultats - 1 : Alignement initial1



min.	-0,2687
Max.	0,2687
Moy.	0,0014
RMS	0,0975
Écart-type	0,0975
Var.	0,0095
+Moy.	0,0725
-Moy.	-0,0735

Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Données de résultats - 1 : Alignement des coordonnées1



Matrix

1	0	0	0
0	1	0	0
0	0	1	0
0	0	0	1

Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Plane Group

Nom	Nom du résultat	Tolérance d'angle	ΔAngle	Normale			Normale de paire		
				X	Y	Z	X	Y	Z
Plan1	Données de résultats - 1		0,283	0	0	-1	-0,0049	-0,0002	-1
Plan2	Données de résultats - 1		0,3884	0,2004	0,9797	0	0,1947	0,9809	0,0034
Plan3	Données de résultats - 1		0,6455	0,1936	0,9811	0	0,1908	0,9816	0,0109
Nombre			3						
Som.			1,3169						
min.			0,2830						
Max.			0,6455						
Moy.			0,4390						
Écart-type			0,1522						
RMS			0,4646						
Var.			0,0232						
Médian			0,3884						

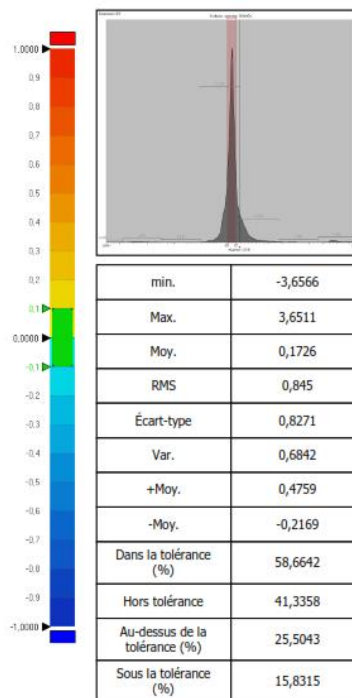
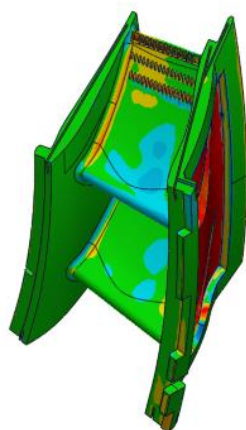
Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Données de résultats - 1 : Cercle1

Nom	Nom du résultat	Centrer			Centre des paires		
		X	Y	Z	X	Y	Z
Cercle1	Données de résultats - 1	0	0	0	0,9178	0,05	1,9188
Nom	Nom du résultat	Tolérance de position		Écart	Tolérance de diamètre		ΔDiamètre
Cercle1	Données de résultats - 1			2,1276			-2,0094

Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Données de résultats - 1 : Comparaison 3D1

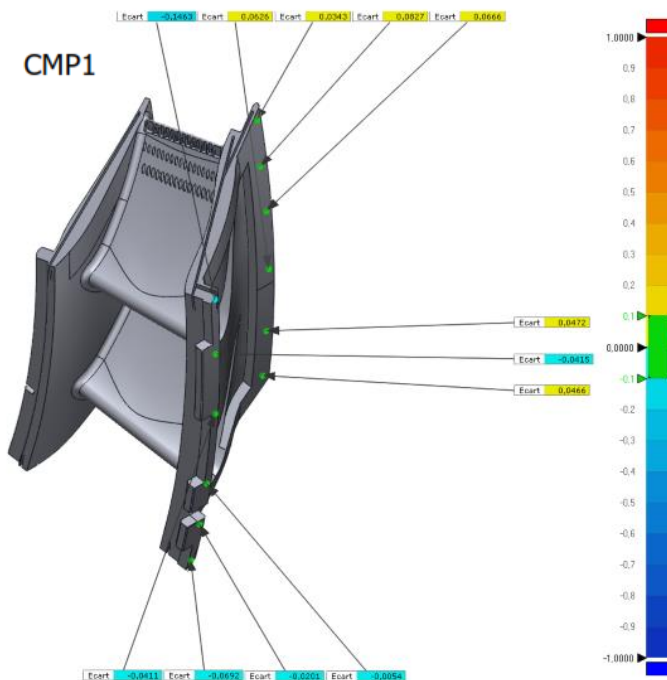


Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Nom	min.	Max.	Moy.	RMS	Écart-type	Var.	+Moy.	-Moy.
Comparaison 3D1	-3,6566	3,6511	0,1726	0,845	0,8271	0,6842	0,4759	-0,2169

Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Données de résultats - 1 : CMP1



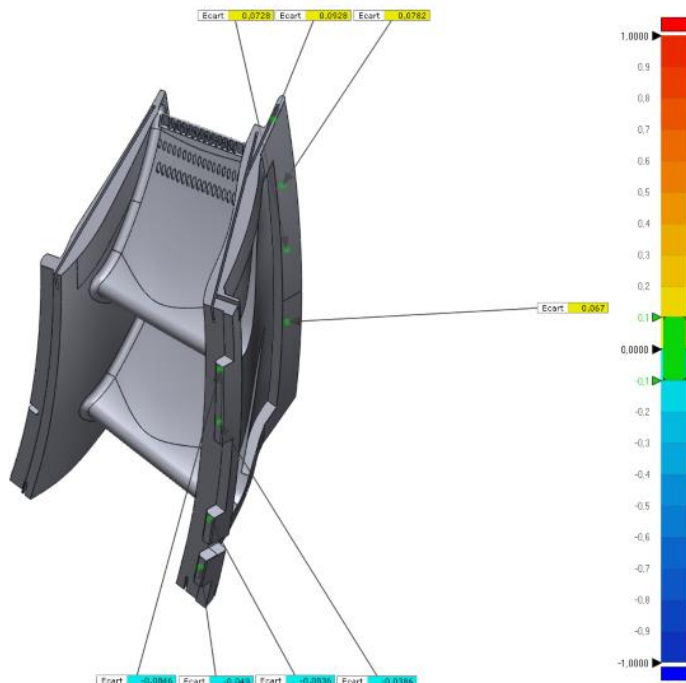
Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Nom	min.	Max.	Moy.	RMS	Écart-type	Var.	+Moy.	-Moy.
CMP1	-0,311	0,0895	-0,0384	0,0989	0,0911	0,0083	0,058	-0,0881

Nom	Nom du résultat	Tolérance	Ecart	Position de référence			Position Mesurée		
				X	Y	Z	X	Y	Z
CMP1: 1	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0692	424,2498	-113,9998	52	424,183	-113,9819	52
CMP1: 2	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0201	429,5578	-91,9999	52	429,5381	-91,9956	52
CMP1: 3	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0054	434,0046	-67,9999	52	433,9993	-67,9991	52
CMP1: 4	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0411	438,341	-29	51	438,3	-28,9972	51
CMP1: 5	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0415	439,2812	4	52	439,2397	3,9997	52
CMP1: 6	Données de résultats - 1	±0,1	-0,1463	438,1324	32	51	437,9865	31,9895	51
CMP1: 7	Données de résultats - 1	±0,1	0,0343	406,1044	82,9999	-7	406,138	83,0067	-7
CMP1: 8	Données de résultats - 1	±0,1	0,0827	409,9866	60,9999	-5	410,0684	61,0123	-5
CMP1: 9	Données de résultats - 1	±0,1	0,0666	412,7544	38	-6	412,8207	38,006	-6
CMP1: 10	Données de résultats - 1	±0,1	0,0626	414,422	8	-6	414,4846	8,0012	-6
CMP1: 11	Données de résultats - 1	±0,1	0,0472	413,7446	-25	-5	413,7917	-25,0028	-5
CMP1: 12	Données de résultats - 1	±0,1	0,0466	411,4731	-50	-5	411,5194	-50,0055	-5

Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Données de résultats - 1 : CMP2



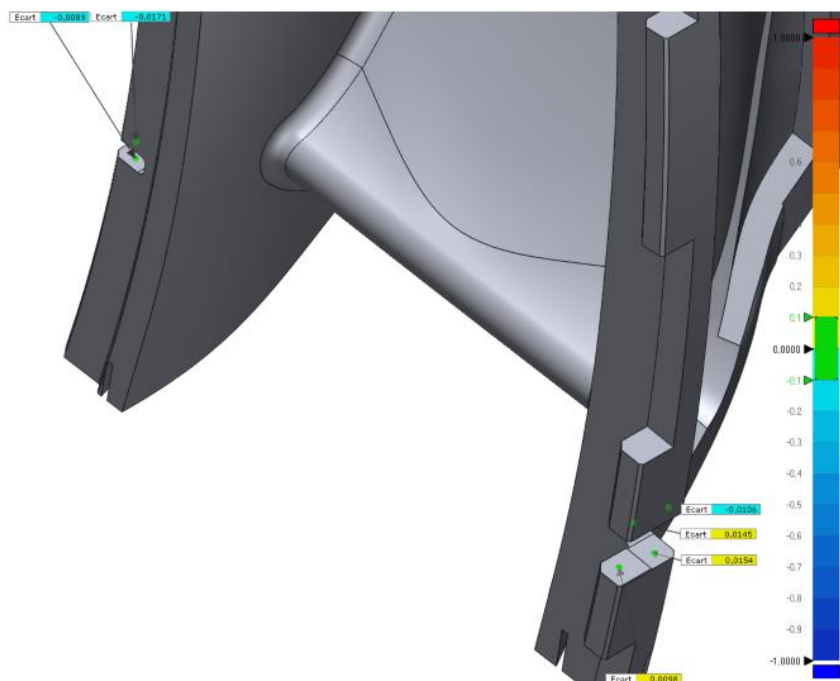
Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Nom	min.	Max.	Moy.	RMS	Écart-type	Var.	+Moy.	-Moy.
CMP2	-0,0926	0,0946	0,0033	0,0726	0,0725	0,0053	0,0766	-0,065

Nom	Nom du résultat	Tolérance	Ecart	Position de référence			Position Mesurée		
				X	Y	Z	X	Y	Z
CMP2: 1	Données de résultats - 1	±0,1	-0,049	422,811	-97,9999	56	422,8587	-98,0109	56
CMP2: 2	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0836	428,0055	-71,9999	56	428,088	-72,0138	56
CMP2: 3	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0386	433,4614	-22	56	433,5	-22,0019	56
CMP2: 4	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0846	434,0011	4	56	434,0857	4,0009	56
CMP2: 5	Données de résultats - 1	±0,1	0,067	410,7262	-15	-5	410,6593	-14,9977	-5
CMP2: 6	Données de résultats - 1	±0,1	0,0728	410,5125	20	-5	410,4399	19,9965	-5
CMP2: 7	Données de résultats - 1	±0,1	0,0782	407,9473	50	-5	407,8696	49,9906	-5
CMP2: 8	Données de résultats - 1	±0,1	0,0928	403,1382	79,9998	-5	403,0471	79,9817	-5

Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Données de résultats - 1 : CMP3



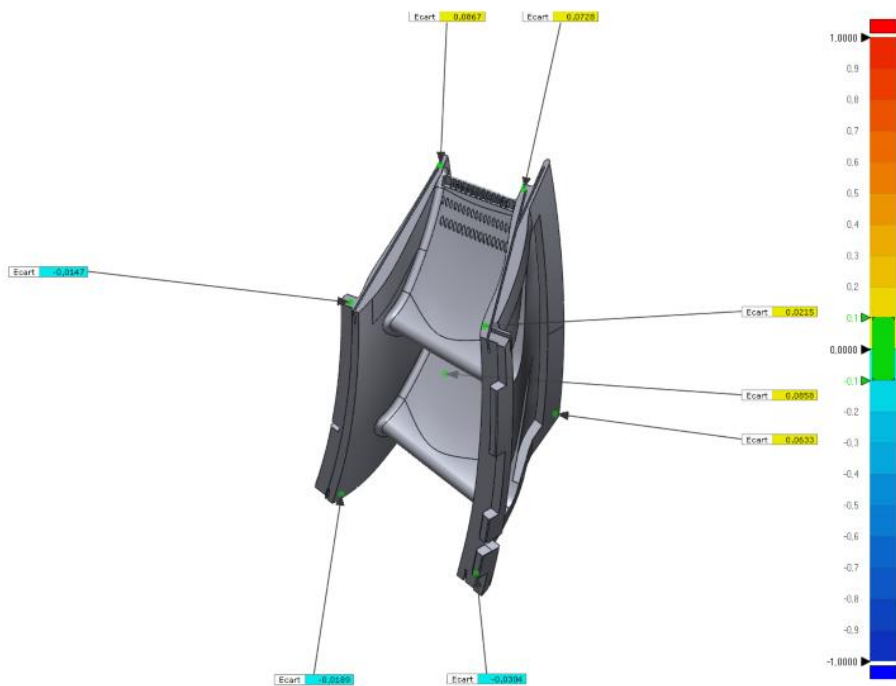
Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Nom	min.	Max.	Moy.	RMS	Écart-type	Var.	+Moy.	-Moy.
CMP3	-0,0215	0,0241	0,0005	0,0141	0,0141	0,0002	0,0125	-0,0141

Nom	Nom du résultat	Tolérance	Ecart	Position de référence			Position Mesurée		
				X	Y	Z	X	Y	Z
CMP3: 1	Données de résultats - 1	±0,1	0,0145	429,2046	-80,7714	56,1928	429,2019	-80,7857	56,1928
CMP3: 2	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0106	429,8541	-80,9291	49,9585	429,856	-80,9188	49,9585
CMP3: 3	Données de résultats - 1	±0,1	0,0154	427,948	-89,371	50,8996	427,9512	-89,3559	50,8996
CMP3: 4	Données de résultats - 1	±0,1	0,0098	427,054	-89,1999	57,0542	427,056	-89,1903	57,0542
CMP3: 5	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0089	330,3182	-67,2059	56,645	330,3164	-67,2147	56,645
CMP3: 6	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0171	330,6766	-63,9522	56,9094	330,6799	-63,9355	56,9094

Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Données de résultats - 1 : CMP4



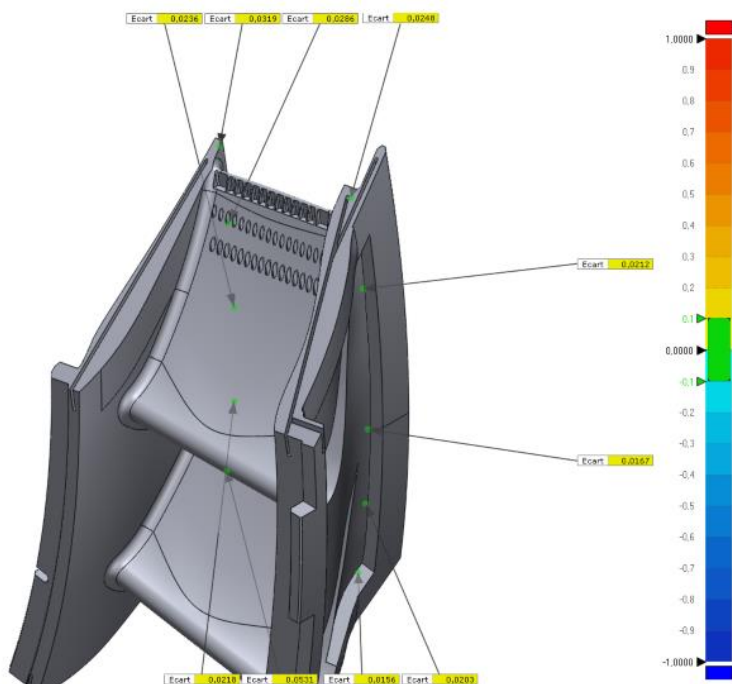
Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Nom	min.	Max.	Moy.	RMS	Écart-type	Var.	+Moy.	-Moy.
CMP4	-0,0466	0,096	0,0324	0,0572	0,0472	0,0022	0,064	-0,0234

Nom	Nom du résultat	Tolérance	Ecart	Position de référence			Position Mesurée		
				X	Y	Z	X	Y	Z
CMP4: 1	Données de résultats - 1	±0,1	0,0215	421	32	48,956	420,9972	32,0149	48,9711
CMP4: 2	Données de résultats - 1	±0,1	0,0728	399	76	1,5508	398,9907	76,0507	1,6022
CMP4: 3	Données de résultats - 1	±0,1	0,0867	346	64	3,7326	345,9888	64,0603	3,7938
CMP4: 4	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0147	340	9	56,8871	340,0019	8,9898	56,8767
CMP4: 5	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0189	332	-105,6965	55	332,0022	-105,6833	55,0134
CMP4: 6	Données de résultats - 1	±0,1	0,0858	348	-54,9691	2,5	347,9901	-55,0289	2,4393
CMP4: 7	Données de résultats - 1	±0,1	0,0633	409	-53,2057	-9,2	408,9927	-53,2497	-9,2448
CMP4: 8	Données de résultats - 1	±0,1	-0,0304	424	-103,4517	58	424,006	-103,4219	58

Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Données de résultats - 1 : CMP5



Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Nom	min.	Max.	Moy.	RMS	Ecart-type	Var.	+Moy.	-Moy.
CMP5	-0,0516	0,0837	0,0285	0,0367	0,0231	0,0005	0,0329	-0,0244

Nom	Nom du résultat	Tolérance	Ecart	Position de référence			Position Mesurée		
				X	Y	Z	X	Y	Z
CMP5: 1	Données de résultats - 1	±0,1	0,0248	400	74	0	400	74	-0,0248
CMP5: 2	Données de résultats - 1	±0,1	0,0212	405	44	0	405	44	-0,0212
CMP5: 3	Données de résultats - 1	±0,1	0,0167	407	-5	0	407	-5	-0,0167
CMP5: 4	Données de résultats - 1	±0,1	0,0203	406	-32	0	406	-32	-0,0203
CMP5: 5	Données de résultats - 1	±0,1	0,0156	403	-58	0	403	-58	-0,0156
CMP5: 6	Données de résultats - 1	±0,1	0,0531	349	-49	0	349	-49	-0,0531
CMP5: 7	Données de résultats - 1	±0,1	0,0218	352	-22,5	0	352	-22,5	-0,0218
CMP5: 8	Données de résultats - 1	±0,1	0,0236	352	11	0	352	11	-0,0235
CMP5: 9	Données de résultats - 1	±0,1	0,0286	350	40	0,0001	350	40	-0,0285
CMP5: 10	Données de résultats - 1	±0,1	0,0319	346	65,5	0	346	65,5	-0,0319

Product Name	[Product Name]	Department	[Department]	Date	Mar 18, 2023
Part Name	[Part Name]	Inspector	[Inspector]	Unit	mm

Références bibliographiques

- [1] P. Benk\Ho and T. Várady, “Segmentation methods for smooth point regions of conventional engineering objects,” *Comput. Des.*, vol. 36, no. 6, pp. 511–523, 2004.
- [2] S. Ali, “La rétro-conception de composants mécaniques par une approche " concevoir pour fabriquer",” Université de Technologie de Troyes, 2015.
- [3] A. Durupt, “Définition d’un processus de rétro-conception de produit par intégration des connaissances de son style de vie,” Troyes, 2010.
- [4] S. Remy, G. Ris, O. Nartz, and A. Bernard, “Reverse engineering of a 1935 Delahaye radiator cap, European Virtual Engineering Network conference 2003, Dublin, Irlande,” 2003.
- [5] A. Bernard *et al.*, “Reverse engineering and rapid prototyping, chapter 9 of the book untitled “Software solutions for Rapid Prototyping “,” *Coord. Ian Gibson, ISBN*, no. 1–86058, pp. 360–361, 2002.
- [6] A. Durupt, S. Remy, and G. Ducellier, “Knowledge based reverse engineering—An approach for reverse engineering of a mechanical part,” *J. Comput. Inf. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 4, 2010.
- [7] J. Elseberg, D. Borrmann, and A. Nüchter, “Efficient processing of large 3d point clouds,” in *2011 XXIII International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies*, 2011, pp. 1–7.
- [8] C. Cao, M. Preda, and T. Zaharia, “3D point cloud compression: A survey,” in *The 24th International Conference on 3D Web Technology*, 2019, pp. 1–9.
- [9] J. Otepka, S. Ghuffar, C. Waldhauser, R. Hochreiter, and N. Pfeifer, “Georeferenced point clouds: A survey of features and point cloud management,” *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 2, no. 4, pp. 1038–1065, 2013.
- [10] V. Raja and K. J. Fernandes, *Reverse engineering: an industrial perspective*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [11] Z. Geng and B. Bidanda, “Review of reverse engineering systems--current state of the art,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 12, no. 2, pp. 161–172, 2017.
- [12] E. Superieure and P. D. Antananarivo, “Developpement de materiel de scan 3d par triangulation laser,” 2016.
- [13] S. Boukebbab and N. Azzam, “Mise en place d’un modèle d’inspection des surfaces à géométries complexes en vue d’une correction process,” 2017.
- [14] J. Breugnot, “Modélisation surfacique et volumique de la peau: classification et analyse couleur,” Saint-Etienne, 2011.
- [15] B. Lorient, B. Lorient, A. De, and N. Autre, “Automatisation de l’ Acquisition et des Post-traitements en Numérisation 3D To cite this version : HAL Id : tel-00371269 T h e ` se Benjamin L oriot D octeur de l ’ U niversit e A utomatization de l ’ A cquisition et des P ost - traitements en N um é ` r,” 2009.

- [16] S. Thibaud, “Une Introduction aux outils de prototypage rapide et aux méthodes de rétro-conception (reverse engineering),” 2007.
- [17] F. Goulette, *Modélisation 3D automatique: outils de géométrie différentielle*. Presses des MINES, 1999.
- [18] V. Uffenkamp, “State of the art of high precision industrial photogrammetry,” in *Third international workshop on accelerator alignment*, 1993.
- [19] B. Desmedt, “Les nouvelles technologies au service du relevé d ’ architecture . Partage d ’ expériences .”.
- [20] Hexagon Metrology, “CMS106 - CMM System User Manual.” France, 2011.
- [21] Hexagon Metrology, “CMS106 User’s Manual Confidential & Proprietary.” France, 2011.
- [22] Hexagon Metrology, “CMS Technology & Specifications.” France, 2011.
- [23] P. Bouvet, “Le Deep Learning pour l’analyse d’images de tomographies,” *MetalBlog*, 2021.
- [24] RX SOLUTIONS, “Tomographie industrielle à rayons x.” France, 2023. [Online]. Available: www.rx-solutions.com
- [25] P. Bouvet, “Le contrôle des pièces par tomographie aux rayons X,” *MetalBlog*, 2021.
- [26] 3D système, “Help Geomagic Design X release note.” 2022.
- [27] 3D système, “Help Geomagic control X.” 2022.
- [28] Hexagon Metrology, “PCDMIS manuel de Formation Niveau II.” France, 2013.
- [29] Hexagon Metrology, “PCDMIS manuel de formation niveau I.” France, 2012.
- [30] M. Neveu, “Surfaces polyédriques et surfaces paramétriques : une reconstruction par approximation via les surfaces de subdivision,” 2010.
- [31] T. Boubekeur and S. Gueorguieva, “Modélisation Géométrique,” p. 75, 2007.
- [32] V. P. Nguyen, P. Kerfriden, and S. P. A. Bordas, “Two- and three-dimensional isogeometric cohesive elements for composite delamination analysis,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 60, no. October 2017, pp. 193–212, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.12.018.
- [33] L. Piegl and W. Tiller, *The NURBS book*. Springer Science & Business Media, 1996.
- [34] A. Claisse and P. Frey, “Modèle de reconstruction d ’ une surface échantillonnée par un méthode de ligne de niveau , et applications To cite this version: Mod ` ele de reconstruction d ’ une surface ee par une m ´ ethode de ligne de niveau , et applications .,” 2009.
- [35] R. Dyer, H. Zhang, and T. Möller, “Delaunay mesh construction,” *Proc. Eurographics Symp. Geom. Process.*, pp. 273–282, 2007.

Résumé

Actuellement, la retro-ingenierie est indispensable en raison de son gain de temps, d'efforts et d'argent. Comme l'industrie est en constante évolution et que la complexité et la précision des pièces mécaniques augmentent, nous avons étudié une pièce qui est considérée comme l'une des plus complexes et précises afin de pouvoir généraliser l'expérience à toutes les autres pièces.

Dans cette thèse, nous avons effectué une rétroconception d'une ailette turbine fixe de première étage partie chaude pour turbine à gaz en utilisant un scanner 3D pour la numérisation et la machine de mesure tridimensionnelle MMT pour vérification de la précision, ainsi qu'une gamme de logiciels pour le traitement et la reconstruction ces logiciels est Geomagic design X, Geomagic control X, COMET plus, PC-DEMIS et SolidWorks.

Le résultat obtenu après les étapes de numérisation, traitement de nuage de points, de reconstruction du modèle CAO, d'alignement et de recalage, ainsi que d'analyse des résidus, a montré une grande précision qui permettra à l'avenir de traiter n'importe quelle pièce, quelle que soit sa complexité et sa précision.

Mots-clés : Rétro-conception, CAO, Numérisation, traitement, Ailette turbine, Nuage de points

ملخص

حاليًا، الهندسة العكسية أصبحت ضرورية بسبب فوائدها في توفير الوقت والجهد والمال. وبما أن الصناعة في تطور مستمر والقطع الميكانيكية تزداد تعقيدًا ودقة، فقد درسنا قطعة تعتبر واحدة من أكثر القطع تعقيدًا ودقة لنتمكن من تعميم الخبرة على جميع القطع الأخرى.

في هذه الأطروحة، قمنا بإجراء عملية هندسة عكسية لزعنفة توربين ثابتة الصف الأول في جزئه الساخن لتوربين الغاز باستخدام ماسح ثلاثي الأبعاد للرقمنة وآلة القياس ثلاثية الأبعاد MMT للتحقق من الدقة، بالإضافة إلى مجموعة من البرامج للمعالجة وإعادة التشكيل وهذه البرامج هي Geomagic design X و Geomagic control X و COMET plus و PC-DEMIS و SolidWorks.

وأظهرت النتيجة التي تم الحصول عليها بعد عملية المسح ومعالجة نقاط السحابة وإعادة بناء النموذج CAO ومعايرته وتحليل البقايا دقة كبيرة ستنجح في المستقبل معالجة أي قطعة بغض النظر عن تعقيدها ودقتها.

الكلمات المفتاحية: الهندسة العكسية، CAO، مسح ثلاثي الأبعاد، معالجة، زعنفة توربين، سحابة النقاط.

Abstract

Currently, reverse engineering is essential because of its saving of time, effort and money. As the industry is constantly changing and the complexity and precision of mechanical parts increase, we have studied a part that is considered one of the most complex and precise in order to be able to generalize the experience to all other parts.

In this thesis, we performed a reverse engineering of a first stage fixed turbine blade hot end for a gas turbine using a 3D scanner for digitization and the three-dimensional measuring machine MMT for accuracy verification, as well as a range The software for processing and reconstruction is Geomagic design X, Geomagic control X, COMET plus, PC-DEMIS and SolidWorks.

The result obtained after the steps of digitization, point cloud processing, CAD model reconstruction, alignment and registration, as well as residual analysis, showed a high accuracy that will allow in the future to process n any part, regardless of its complexity and precision.

Keywords: Reverse engineering, CAD, Digitization, processing, Turbine blade, Point cloud.