

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



## MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Génie Mécanique

**Parcours :** Master

**Spécialité :** Construction Mécanique

### Thème

Reconstruction des surfaces scannées  
afin de les fabriquer par MOCN

Préparé par :

BENALLAL Abdelhak et YAMOUNI Sarah warda

Soutenu publiquement le : / 07 / 2021, devant le jury composé de :

M.AISSAT Sahraoui	Maître de Conférences "A"(Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. GUEMMOUR Mohamed boutkhil	Maître de Conférences "B"(Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. BALTACH Abdelghani	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. MECHKOUR Elhadi	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

Année universitaire : 2020 - 2021

## DÉDICACE

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL AUX ÊTRES LES PLUS CHERS AU  
MONDE.

MA MÈRE(MOKHTARIA) ET MON PÈRE (DJAMEL) EN TÉMOIGNAGE DE  
L'AMOUR, DU RESPECT ET DE LA GRATITUDE QUE JE LEUR PORTE ;

À MES FRÈRES (AMINE ET ILYAS) ;

À MON GRAND-PÈRE MILOUD ET QUE DIEU AIT PITIÉ DES ÂMES DE MES  
3 GRANDS PARENTS ;

À MES AMIS ET MA FAMILLE ET TOUS CEUX QUI M'ONT AIDÉ DE LOIN  
ET DE PRÈS, ET PLUS PARTICULIÈREMENT KHALDIA, RACHA,  
NOREDDINE, FAIZA;

À TOUTE LA PROMOTION DE GÉNIE MÉCANIQUE 2020/2021 ;  
ET SURTOUT MON BINÔME BENALLAL ABDELHAK.

YAMOUNI SARAH WARDIA

# *D*édicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A mes chers Parents*

*A mes Frères et ma Sœur*

*A toute ma Famille et toutes mes Amis(e)s*

*Et à ceux avec qui je partage de bons souvenirs.*

**BENALLAL ABDELHAK**



## REMERCIEMENTS

Ce travail est le fruit de la combinaison d'efforts de plusieurs personnes. Je remercie tout d'abord le tout puissant qui, par sa grâce nous a permis d'arriver au bout de nos efforts en nous donnant la santé, la force, le courage et en nous faisant entourer des merveilleuses personnes dont nous tenons à .remercier

Nous tenons aussi à remercier vivement notre promoteur M. MECHEKOUR Elhadi maitre de conférence "B" pour son encadrement, ces conseils et sa .disponibilité

: Nos remerciements aux

M. le président de jury AISSAT sahraoui maitre de conférences "A". M. l'examineur de jury GUEMMOUR Mohamed Boutkhil maitre de conférences "B". M. l'examineur de jury BALTACH Abdelghani maitre de conférences "A" de nous avoir fait l'honneur de juger notre modeste travail

Nos remerciements vont également à tous nos enseignants, les responsables et personnel du département de Génie mécanique de l'université IBN .KHALDOUN de Tiaret

Nous adressons nos plus vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail et à nos familles sur tout

Enfin nous remercions tous nos amis.

# Sommaire

Dédicaces

Remerciement

Listes des figures

INTRODUCTIONS GÉNÉRALE..... 2

## CHAPITRE I Généralités sur le processus d'ingénierie inverse

I.1 INTRODUCTION .....	4
I.2 L'ingénierie inverse .....	4
I.2.1 reconstruction des surfaces .....	6
I.3 Représentation de la pièce 3D.....	9
1.3.1 Maillage .....	9
I.3.1.1 Maillage structuré .....	10
I.3.1.2 Maillage non-structuré .....	11
I.3.1.3 Maillage hybride.....	11
1.3.2 Modèles de représentation en CAO .....	12
I.3.2.1 La représentation de filaire .....	12
I.3.2.2 La représentation par les frontières (BRep) .....	13
I.3.2.3 La représentation solide (volumique).....	15
I.4 Format des fichiers .....	17
I.5 Application de la CAO .....	19
I.5.1 Assemblage de composantes.....	19
I.5.2 Mise en plans .....	19
I.5.3 Fabrication assistée par ordinateur .....	20
I.5.4 Prototypage rapide.....	21
I.5.5 Analyses par éléments finis ou simulation .....	22
I.5.6 L'étude cinématique (étude du mouvement).....	22
I.6 CONCLUSION .....	23

## CHAPITRE II Reconstruction des surfaces

II.1 INTRODUCTION.....	25
II.2 Processus de reconstruction des surfaces.....	25
II.3 Méthodes d'acquisition des données.....	26
II.3.1 Tomographie.....	26
II.3.2 Photogrammétrie.....	30
II.3.2.1 Définition .....	30

II.3.2.2 Système et logiciel.....	31
II.3.2.3 Calibrage de la caméra .....	32
II.3.2.4 Précision .....	32
II.3.2.5 Un cas pratique.....	33
II.3.3 Scanneur laser .....	34
II.3.4 Machines à Mesure Tridimensionnel (MMT) .....	35
II.4 Méthode de reconstruction des surfaces .....	36
II.5 Génération de modèle CAO - opérations de finition .....	44
II.6 Stratégies de reconstruction CAO.....	44
II.7 Exemple d'un processus de reconstruction des surfaces .....	47
II.7.1 Le scannage de la surface.....	47
II.7.2 Traitement des données scannées .....	47
II.7.3 La reconstruction .....	48
II.7.4 Exploitation de la surface reconstruite.....	49
II.8 Conclusion.....	49

## CHAPITRE III Étude de cas

III.1 INTRODUCTION.....	51
III.2 Présentation des logiciels spécialisés.....	51
III.2.1 Meshroom.....	52
III.2.1.1 Présentation .....	52
III.2.1.2 L'interface utilisateur graphique de Meshroom.....	52
III.2.1.3 Les étapes de traitement dans le logiciel Meshroom .....	53
III.2.2 MeshLab.....	57
III.2.2.1 Architecture générale de MeshLab .....	57
III.2.3 ScanTo3D (Solidworks) .....	60
III.2.3.1 Représentation .....	60
III.2.3.2 Les étapes de la numérisation dans SOLIDWORKS .....	60
III.2.3.3 Les fonctionnalités de ScanTo3D.....	60
III.3 Etude de cas.....	61
III.3.1 L'acquisition des données.....	61
III.3.2 Le traitement avec Meshroom.....	62
III.3.3 Le traitement avec MeshLab .....	65
III.3.4 Le traitement avec Solidworks .....	67

<b>III.3.5 Usinage de la pièce sur une MOCN.....</b>	<b>80</b>
<b>III.4 CONCLUSION .....</b>	<b>88</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>90</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEB-GRAPIQUES .....</b>	<b>92</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>97</b>
<b>RÉSUMÉ</b>	

# Liste des abréviations

**2D** deux **D**imensions

**3D** trois **D**imensions

**3DS** 3D StudioMax

**BPA** **B**all **P**ivoting **A**lgorithm

**BRep** **B**oundary **R**epresentation

**CAO** **C**onception **A**ssisté par **O**rdinateur

**CFAO** **C**onception et **F**abrication **A**ssisté par **O**rdinateur

**CSG** **C**onected **S**olid **G**eometry

**CT** **C**omputer **T**omography

**FAO** **F**abrication **A**ssistée par **O**rdinateur

**Geomagic Studio** Logiciel de numérisation 3D pour l'ingénierie inverse

**IGES** **G**raphics **E**xchange **S**pecification

**Latex** Logiciel de traitement des documents

**MMT** **M**achines à **M**esurer **T**ridimensionnelle

**MOCN** **M**achine **O**util à **C**ommande **N**umérique

**OBJ** **o**bj (format des fichiers maillage)

**Raindrop** Un gestionnaire de (bookmarks / signets)

**STEP** **S**tandard for **E**xchange of **P**roduct

**STL** **S**Tereo-**L**ithography

**VRML** **V**irtual **R**eality **M**odeling **L**anguage

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.1</b> : Représentation de quelque domaine de l'ingénierie inverse .....	4
<b>Figure I.2</b> : Un exemple de l'ingénierie inverse en mécanique .....	5
<b>Figure I.3</b> : Exemple de reconstruction de surface d'un visage.....	6
<b>Figure I.4</b> : Exemple de reconstruction de surface en médecine .....	6
<b>Figure I.5</b> : Superposition d'un diagramme de Voronoï (en rouge) et de sa triangulation de Delaunay (en noir).....	8
<b>Figure I.6</b> : Ball Pivoting Algorithm en présence de données parasites .....	8
<b>Figure I.7</b> : Maillage d'une pièce .....	10
<b>Figure I.8</b> : Maillage structuré .....	10
<b>Figure I.9</b> : Maillage non-structuré.....	11
<b>Figure I.10</b> : Maillage hybride .....	12
<b>Figure I.11</b> : Représentation par fil de fer .....	13
<b>Figure I.12</b> : Représentation surfacique .....	14
<b>Figure I.13</b> : Modélisation solide .....	15
<b>Figure I.14</b> : Modélisation par occupation de l'espace .....	16
<b>Figure I.15</b> : Représentation d'une Composition arborescente d'un solide .....	17
<b>Figure I.16</b> : Exemple d'assemblage des pièces avec un modèle CAO .....	19
<b>Figure I.17</b> : Mise en plane d'une pièce a l'aide de modèle CAO .....	20
<b>Figure I.18</b> : Détermination de trajectoires d'outils .....	21
<b>Figure I.19</b> : Processus de Prototypage Rapide .....	21
<b>Figure I.20</b> : Exemple d'application du CAO dans l'analyse par élément finis .....	22
<b>Figure I.21</b> : Analyse cinématique d'une suspension d'un véhicule.....	23
<b>Figure II.1</b> : Un modèle Engrener .....	26
<b>Figure II.2</b> : Génération de nuages de points: méthode 2D (à gauche) et méthode 3D (à droite).....	27
<b>Figure II.3</b> : Cylindre de moteur de moto: tomogramme unique et contours de certaines tranches .....	28
<b>Figure II.4</b> : Cylindre du moteur de la moto: visualisation 3D du tomogramme entier et coupé....	29
<b>Figure II.5</b> : Représentation d'un processus de photogrammétrie .....	31
<b>Figure II.6</b> : Diagramme de Classification des techniques de photogrammétrie.....	31
<b>Figure II.7</b> : Représentation d'un Modèle d'étalonnage .....	32
<b>Figure II.8</b> : Squelette complet du siège d'auto (a) et composant testé (b) .....	33

<b>Figure II.9</b> : Représentation d'un siège traité .....	34
<b>Figure II.10</b> : Un exemple de scanneur laser .....	35
<b>Figure II.11</b> : Représentation des genres de MMT (locale/portable).....	36
<b>Figure II.12</b> : Diagramme explicatif du procédure globale pour la reconstruction des surfaces.....	37
<b>Figure II.13</b> : Représentation des patchs triangulaires .....	38
<b>Figure II.14</b> : Le type de face analytique .....	39
<b>Figure II.15</b> : Reconstruction d'une fonction d'extrusion .....	39
<b>Figure II.16</b> : Extraction du contour de révolution de la révolution fonctionnelle .....	40
<b>Figure II.17</b> : Reconstruction de la révolution fonctionnelle .....	40
<b>Figure II.18</b> : Reconstruction d'un balayage fonctionnel.....	41
<b>Figure II.19</b> : Reconstruction d'un modèle de tournevis .....	42
<b>Figure II.20</b> :L'illustration de la génération de la fonction de fusion .....	43
<b>Figure II.21</b> :Reconstruction des pièces mécaniques avec des fonctions de fusion .....	43
<b>Figure II.22</b> : Scannage de la surface du véhicule .....	47
<b>Figure II.23</b> : Résultat de la surface scannée.....	47
<b>Figure II.24</b> : Génération du modèle avec l'utilisation de la symétrie.....	48
<b>Figure II.25</b> : Isolation de la partie à reconstruire (par choc).....	48
<b>Figure II.26</b> :Le modèle du par choc obtenue après le traitement .....	49
<b>Figure II.27</b> :La triangulation et la simulation du par choc.....	49
<b>Figure III.1</b> :Représente des différentes procédures .....	51
<b>Figure III.2</b> : représentation d'inter face de Meshroom.....	53
<b>Figure III.3</b> :Représentation des trois premières boites de Meshroom.....	53
<b>Figure III.4</b> : Représentation des boites dans Meshroom .....	54
<b>Figure III.5</b> : Représentation des autres boites dans Meshroom .....	55
<b>Figure III.6</b> : Représentation de l'interface de MeshLab .....	57
<b>Figure III.7</b> : Représentation de chaîne de génération du modèle 3D .....	60
<b>Figure III.8</b> :Représentation d'échantillon .....	62
<b>Figure III.9</b> :Représentation d'interface de Meshroom .....	63
<b>Figure III.10</b> : Représentation des positions de la camera .....	63
<b>Figure III.11</b> : Les trois boites qui doivent être supprimés .....	64
<b>Figure III.12</b> :Représentation du la fenêtre et leur option a droit.....	65
<b>Figure III.13</b> : Représentation du l'Interface de MeshLab.....	65
<b>Figure III.14</b> : Représentation des modèles traités .....	66
<b>Figure III.15</b> : Modèle du cas d'étude.....	66

<b>Figure III.16</b> : Le maillage obtenu texturé.....	67
<b>Figure III.17</b> : Le maillage dans Solidworks.....	67
<b>Figure III.18</b> : Représentation d’orientation de maillage.....	68
<b>Figure III.19</b> : Représentation des outils de sélection.....	68
<b>Figure III.20</b> : Maillage avec réduction de triangulation .....	69
<b>Figure III.21</b> : Les trous sélectionnés dans le maillage.....	69
<b>Figure III.22</b> : Représentation du processus de lissage.....	70
<b>Figure III.23</b> : Représentation de la dernière étape .....	70
<b>Figure III.24</b> : Représentation du l’étape édition de maillage.....	71
<b>Figure III.25</b> : Représentation des courbes du modèle .....	72
<b>Figure III.26</b> : Représentation des méthodes de création de volume/surface .....	72
<b>Figure III.27</b> : Représentation de la création automatique.....	73
<b>Figure III.28</b> : Représentation de l’ajute des lignes de fonction .....	73
<b>Figure III.29</b> : La comparaison de triangulation après la modification des lignes de fonction.....	74
<b>Figure III.30</b> : Représentation du modèle 3D.....	74
<b>Figure III.31</b> : les Plan coïncidé aux surfaces du modèle .....	75
<b>Figure III.32</b> : Représentation de création des surfaces.....	76
<b>Figure III.33</b> : Représentation de tout les surfaces forment le nouveau modèle .....	76
<b>Figure III.34</b> : Représentation d’option du prolongement .....	77
<b>Figure III.35</b> : Représentation du modèle après le prolongement et l’option de restreindre .....	77
<b>Figure III.36</b> : Représentation du l’ancien modèle dans le nouveau modèle obtenue.....	77
<b>Figure III.37</b> : Représentation de l’option surface cousue avec la sélection des surfaces .....	78
<b>Figure III.38</b> : Représentation de l’option répétition linéaire et la symétrie du modèle .....	78
<b>Figure III.39</b> : Le modèle après la symétrie .....	79
<b>Figure III.40</b> : Représentation de la méthode de conversion des surfaces.....	79
<b>Figure III.41</b> : Représentation du bossage des surfaces.....	80
<b>Figure III.42</b> : Représentation du modèle finale.....	80
<b>Figure III.43</b> : Exemples d’utilisation du modèle CAO de la pièce étudiée .....	81
<b>Figure III.44</b> : Fenêtre de création d’un nouveau projet sur GibbsCAM.....	82
<b>Figure III.45</b> : Fenêtre de GibbsCAM avec la pièce positionnée dans le brut .....	82
<b>Figure III.46</b> : Fenêtre de définition des outils d’usinage dans GibbsCAM .....	83
<b>Figure III.47</b> : Fenêtres de définition des opérations d’usinage dans GibbsCAM .....	84
<b>Figure III.48</b> : Génération de la trajectoire d’outil pour l’opération de surfacage dans GibbsCAM.....	84

<b>Figure III.49</b> : Simulation d'une opération d'usinage dans GibbsCAM.....	85
<b>Figure III.50</b> :Trajectoire d'usinage des 3 rainures dans GibbsCAM .....	85
<b>Figure III.51</b> :Trajectoire de contournage du profil de la pièce dans GibbsCAM .....	86
<b>Figure III.52</b> :Fenêtre de GibbsCAM avec la gamme d'usinage finie .....	86
<b>Figure III.53</b> :Fenêtre d'analyse de la pièce usinée après simulation finale d'usinage .....	87
<b>Figure III.54</b> : Exemple de génération de programme G-code de la pièce pour une fraiseuse verticale avec une commande Fanuc 0M.....	87

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Dans un contexte industriel comme celui de notre pays où les machines sont relativement anciennes et où les pièces de rechanges ne sont plus disponibles, comme dans le cas des produits mal ou pas du tout documentés dans certaines entreprises nationales, l'ingénierie inverse représente la solution idéale. Cette thématique de recherche appliquée a connu un développement important ces dernières années grâce au développement des outils informatiques aussi bien sur le plan matériel que logiciel. A partir, de ce constat nous nous sommes intéressés à la reconstruction de surfaces qui constitue le fondement de l'ingénierie inverse en mécanique.

L'objectif principal de notre mémoire de fin d'études est de reconstruire le modèle CAO d'une pièce physique afin de générer le programme d'usinage sur MOCN de celle-ci. Cela implique la mise en œuvre du processus de reconstruction de surfaces dans sa globalité et ainsi montrer qu'avec des moyens modestes nous pouvons mettre en application l'ingénierie inverse. Cela permet aussi d'avoir un mode d'emploi pour ceux qui veulent utiliser cette technique pour des projets industriels réels. Pour cela, nous avons organisé notre mémoire de la manière suivante :

Le premier chapitre présente des généralités sur le domaine de l'ingénierie inverse. Des définitions des concepts liés à cette thématique sont développés tout le long du chapitre pour faciliter la compréhension des chapitres suivants.

Dans le deuxième chapitre, nous avons détaillé le processus de reconstruction de surfaces. Ce processus complexe contient plusieurs étapes comme l'acquisition des données géométriques, le traitement des nuages de points, la manipulation de maillage, etc. Des exemples sont donnés pour illustrer la mise en application de ces techniques.

Le troisième et dernier chapitre concerne l'étude de cas. Nous avons choisi une pièce prismatique à partir du hall technologique et nous avons appliqué le processus de reconstruction de surfaces pour reconstruire son modèle CAO. Enfin, nous avons utilisé le logiciel de FAO pour générer le programme d'usinage de cette pièce sur MOCN. Malheureusement, nous n'avons pas eu le temps de la réaliser sur l'une des machines à CN existantes au niveau de notre faculté.

**CHAPITRE I**  
**GÉNÉRALITÉS SUR LE**  
**PROCESSUS D'INGÉNIERIE**  
**INVERSE**

## I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons définir l'ingénierie inverse et ses domaines d'utilisations, notamment dans le domaine du génie mécanique. Nous aborderons également la notion de représentation d'une pièce mécanique, sachant que le produit étudié passera lors du processus d'ingénierie inverse par plusieurs représentations. Pour y arriver, nous devons mentionner quelques types de maillage et quelques représentations du modèle CAO, ces représentations nécessitent des formats utilisables dans certains logiciels spécialisés. Et pour finir, nous allons rappeler les domaines d'application de la CAO, étant donné que dans notre mémoire notre finalité est de réaliser le programme d'usinage par CN de la pièce reconstruite.

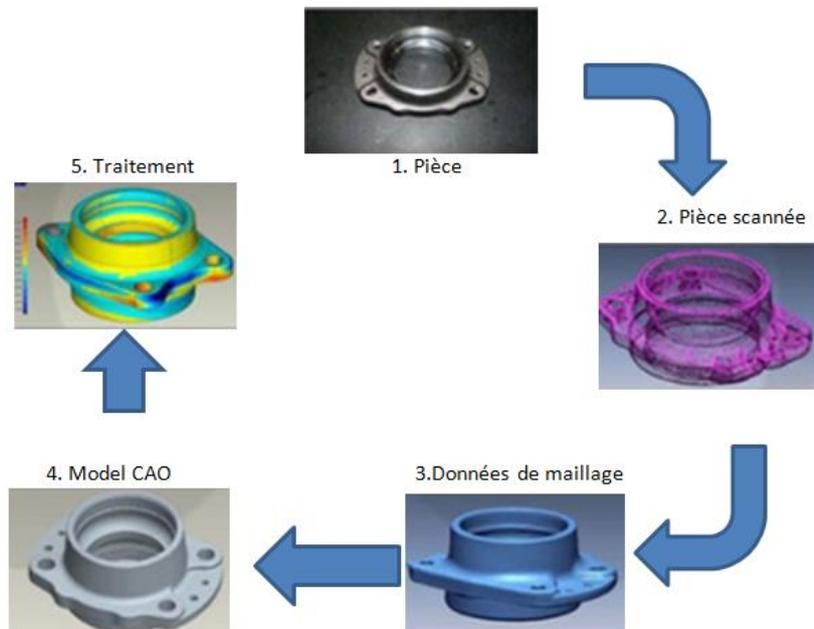
## I.2. L'ingénierie inverse

L'ingénierie inverse (Reverse Engineering) ou rétro-ingénierie, représente l'étude et l'analyse d'un système pour en déduire son fonctionnement interne et pouvoir le reproduire dans la limite du droit de la propriété industrielle. On la retrouve dans de nombreux domaines de l'ingénierie mais pas que, par exemples : génie civil, mécanique, ingénierie navale, aéronautique, médecine, architecture, archéologie... (Voir figure I.1) L'autre domaine où on retrouve l'ingénierie inverse est le domaine de l'informatique mais cette fois son but sera la documentation, la conversion, la maintenance ou l'évolution d'anciennes applications.[1]



Figure I.1 : Représentation de quelques domaines de l'ingénierie inverse [2] [3]

Dans le domaine mécanique, l'ingénierie inverse est l'activité de création des fichiers CAO à partir d'objets physiques. Dans ce domaine, on peut dire aussi que l'ingénierie inverse est le concept de base de la fabrication des pièces sur la base de leurs modèles physiques ou originaux. (Voir figure I.2)



**Figure I.2** : Un exemple de l'ingénierie inverse en mécanique

Au début, l'ingénierie inverse vise à analyser les produits par l'expérience pour comprendre comment ils sont conçus et comment ils fonctionnent. On retrouve son utilisation et son fonctionnement dans le produit seul. Ensuite, nous pouvons reconcevoir le produit en 3D sur des logiciels et créer des produits améliorés à partir des anciens. [4]

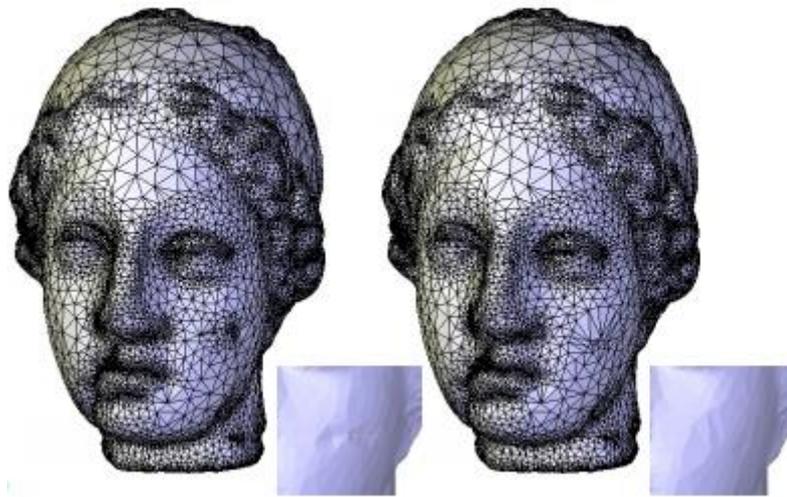
Aujourd'hui, à l'aide de la technologie de numérisation 3D tels que le scanner laser, la tomodensitométrie, et bien d'autres dont nous parlerons dans le deuxième chapitre, nous pouvons collecter des informations précieuses sur le fonctionnement des machines ou d'appareils mécaniques et ainsi faciliter la reconstruction de leur modèle 3D. De son côté, L'ingénierie inverse vise à concevoir et assembler divers composants d'un produit afin de le transformer en un appareil fonctionnel.[5]

L'ingénierie inverse a de nombreuses utilités tel que:

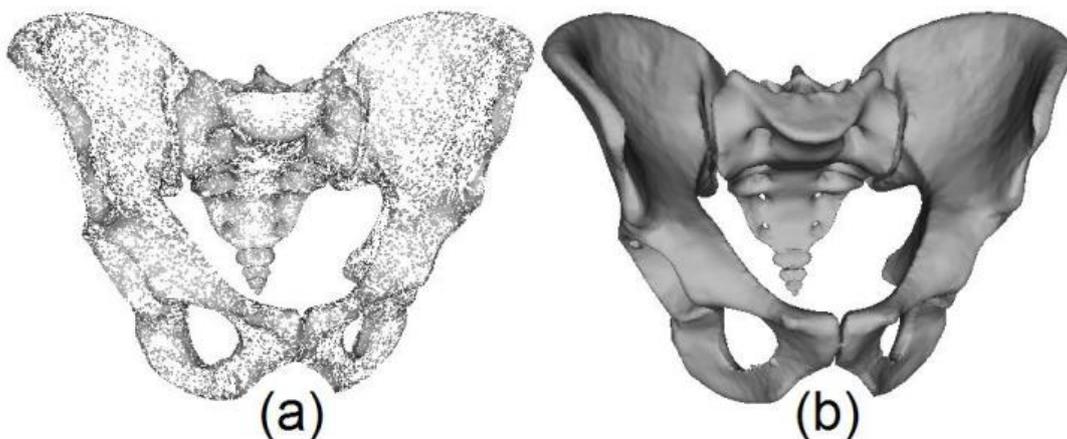
- La compréhension en détail du fonctionnement d'une pièce.
- Amélioration de la sécurité et la qualité d'une pièce.
- Reproduire une pièce.

### I.2.1 Reconstruction des surfaces

D'après ce que l'on vient de voir sur l'ingénierie inverse, l'une des tâches essentielles dans le domaine de la mécanique est la reconstruction de surfaces d'un produit physique en un modèle CAO exploitable. Cette étape du processus d'ingénierie inverse constitue à elle seule un domaine en plein expansion que sa soit dans le domaine de la recherche ou celui de l'industrie. La reconstruction des surfaces a plusieurs domaines d'utilisation qui ressemblent à ceux de l'ingénierie inverse mais pas que, comme l'architecture au patrimoine, la médecine, l'urbanisme, la mécanique, l'industrie, et d'autre domaine. (Voir figure I.3 et I.4)



**Figure I.3 :** Exemple de reconstruction de surface d'un visage [6]

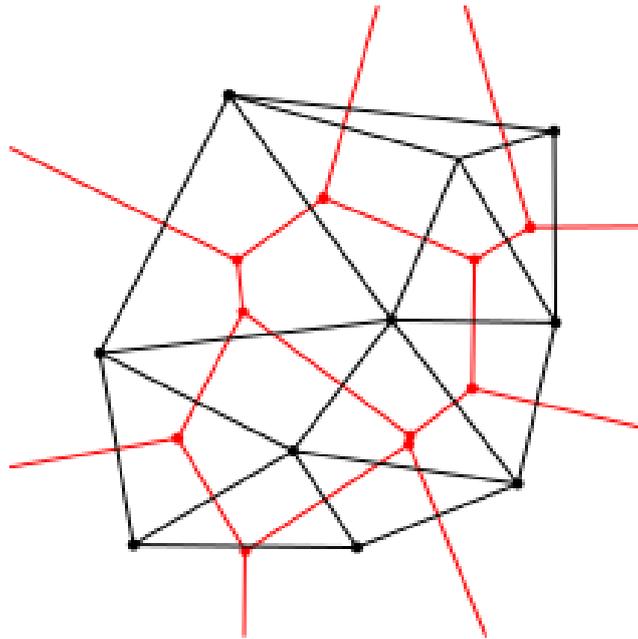


**Figure I.4 :** Exemple de reconstruction de surface en médecine [7]

Si on veut donner une définition adaptée à notre travail, on dira que la transformation de nuage de point inorganisé à un modèle d'objet ponctuel c'est la reconstruction des surfaces dont on va parler.

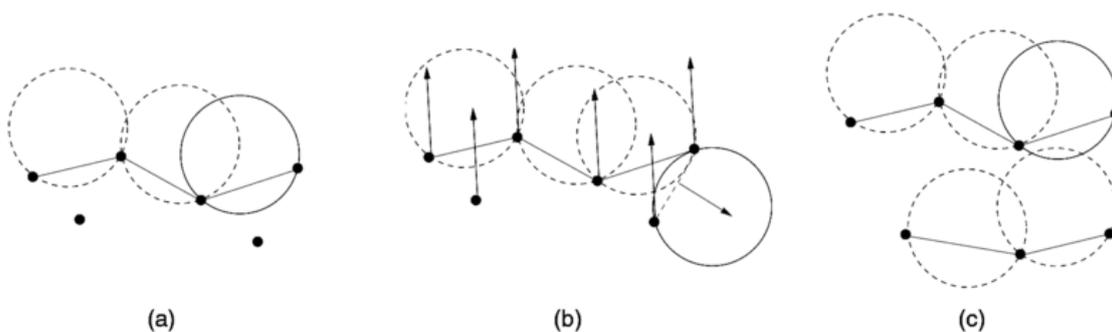
Précisément en mécanique, comme nous l'avons vu dans l'exemple de la Figure I.2, l'ingénierie inverse s'agit de capturer des informations sous forme de nuage des points. Après l'obtention du contour des points en passe à la reconstruction de la surface. Des étapes de prétraitement peuvent être nécessaires avant la reconstruction de la surface pour éliminer et filtrer le bruit des points indésirables, et la simplification des données d'entrée. L'équipement de numérisation n'est pas parfait, de sorte que les données d'entrée peuvent contenir des points faux. Le bruit des points affecte le résultat de la reconstruction de surface. Cela peut entraîner des valeurs anormales sur la surface reconstruite, ou pire, le résultat peut ne pas du tout reproduire l'objet numérisé. En fait, les erreurs de la numérisation sont synonymes d'imprécision. En supposant que l'entrée est sans bruit ( température , atmosphère ,éclairage.. etc ) , cela sacrifiera la précision et produira des valeurs aberrantes. Cependant, dans certaines techniques de reconstruction, il s'agit d'une solution aux données encombrées. D'un autre côté, le filtrage dans l'étape de prétraitement est une autre idée qui peut réduire les données invalides à l'aide de certains logiciels spécialisés.

La méthode de triangulation des surfaces représente la technique de reconstruction de surface la plus simple et la plus ancienne. La triangulation de Delaunay est une triangulation unique d'un point spécifique, où aucun des triangles ne contient d'autres points dans l'ensemble .Le diagramme de Voronoï est le binaire de la triangulation de Delaunay d'un ensemble des points. Le diagramme de Voronoï de l'ensemble de points est composé de surfaces de Voronoï. La surface de Voronoï est une unité (dans un espace polygonal à deux dimensions) qui contient un point d'un groupe dont les côtés sont équidistants du point voisin le plus proche du groupe. Étant donné que le diagramme de Voronoï de l'ensemble de points est le binaire de la triangulation de Delaunay, des techniques de conversion simples peuvent être utilisées pour les convertir les unes aux autres.[8] (Voir figure I.5)



**Figure I.5 :** Superposition d'un diagramme de Voronoï (en rouge) et de sa triangulation de Delaunay (en noir). [9]

Le Ball Axis algorithm (The Ball Pivoting Algorithm) (BPA) est une autre méthode de reconstruction directe de surface qui tente de reconstruire un modèle de surface 3D à partir d'un ensemble de points en utilisant une idéologie complètement différente. La technologie utilisée dans le BPA est très simple et intuitive. Une boule de rayon différent roule sur ces points pour créer des triangles. Si le triangle ne contient pas d'autre point, trois points consécutifs touchant la boule roulante créeront un nouveau triangle. Ce processus itératif commence par un triangle de départ, crée un nouveau triangle en faisant rouler la balle sur le bord pour croiser tous les côtés, puis commence avec un autre triangle de départ pour passer tous les points (Voir figure I.6). Différents rayons aident l'algorithme à surmonter le problème des irrégularités ou de la densité d'échantillon inégale.



**Figure I.6 :** Ball Pivoting Algorithm en présence de données parasites [10]

Une autre méthode basée sur la triangulation de Delaunay. L'algorithme utilise une triangulation incrémentale pour créer une surface à partir de données de zone 3D non structurées. Il comprend quatre étapes : l'arithmétique ordinaire, la sélection des points candidats, l'arithmétique d'adjacence de Delaunay et la triangulation. La première étape consiste à calculer les vecteurs normaux de tous les points d'échantillonnage. La deuxième étape consiste à définir un sous-ensemble de points qui peuvent être des sommets adjacents dans la face d'extrémité du triangle. Dans l'étape de calcul de Delaunay adjacente, pour chaque point candidat de l'étape précédente, le voisinage Delaunay local du point est sélectionné. Dans la dernière étape, une surface triangulaire est créée sur la base des points candidats et des points du voisinage local de Delaunay.

Une autre méthode est basée sur un algorithme incrémental prédictif rapide et efficace en mémoire pour la reconstruction de surface. Cette méthode commence à n'importe quel point pour construire la zone. Premièrement, il trouve tous les points des coins adjacents dans le terme de triangulation du point de départ. Ensuite, il traite d'abord tous les points adjacents dans la vue pour trouver les points d'angle adjacents. En manipulant tous les points de l'ensemble de données et en créant progressivement des triangles, l'algorithme cible la surface triangulaire reconstruite. L'algorithme se compose de trois étapes : (1) des seaux, (2) des points d'élagage et (3) une triangulation.

Une autre méthode de reconstruction de surface basée sur Delaunay. L'algorithme utilise une méthode spéciale de choix de triangles. En utilisant cette méthode, créez d'abord une triangulation de Delaunay de la phrase d'entrée. Ensuite, selon certaines contraintes topologiques, des triangles candidats sont sélectionnés. En sélectionnant des triangles dans la liste prioritaire des triangles candidats et en les reliant entre eux, la surface résultante est progressivement reconstruite. Et il ya d'autres méthodes appropriées de reconstruction des surfaces basée sur la triangulation.[8]

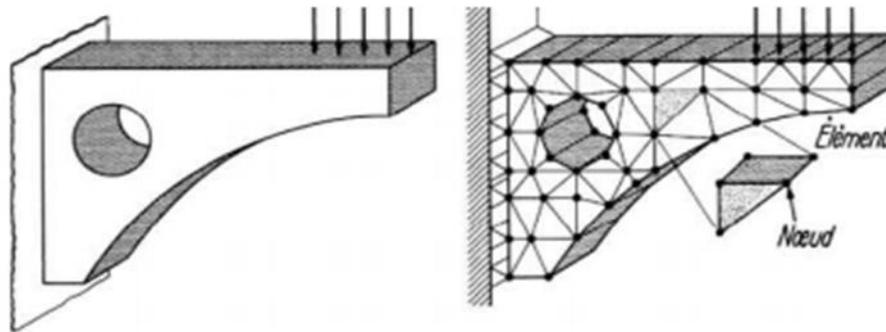
### **I.3. Représentation de la pièce 3D**

Les deux représentations principales par lesquelles la pièce reconstruite passe sont : le maillage et le modèle CAO. Ce dernier lui-même possède un certain nombre de représentations spécifiques que nous allons détailler par la suite.

#### **I.3.1 Maillage**

Les solides sont décomposés en éléments géométriques simples avec des arêtes communes, et leurs nœuds ou sommets sont les points de connexion entre plusieurs éléments.

Ces nœuds seront les points d'application des forces intérieures ou extérieures. L'opération de décomposition est le maillage. Un bon maillage doit faciliter les opérations prévues par un programme d'ordinateur. Il faut donc adopter une méthode systématique de numérotation des nœuds et des éléments. (Voir figure I.7) [11]

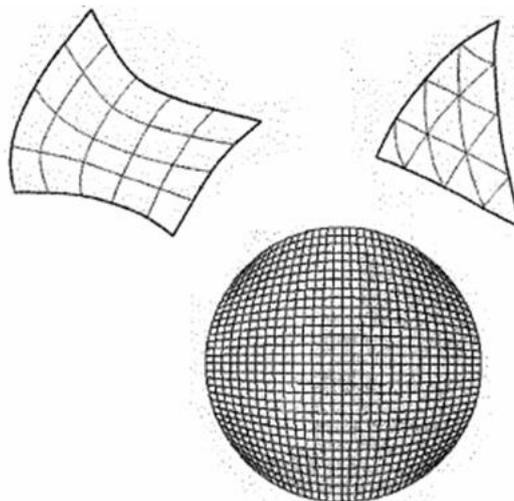


**Figure I.7 :** Maillage d'une pièce[11]

Il existe trois principaux types de maillages : les maillages structurés, les maillages non structurés et les maillages hybrides.

### I.3.1.1 Maillage structuré :

Un maillage structuré est caractérisé par un motif répétitif, le même nombre d'éléments autour de chaque nœud interne et une numérotation consécutive des éléments. Les maillages structurels sont peu susceptibles de contenir des éléments déformés. (Voir figure I.8) [12]



**Figure I.8 :** Maillage structuré.[12]

### I.3.1.2 Maillage non-structuré

La caractéristique des maillages non-structurés est l'absence de motif, le nombre d'éléments autour des nœuds qui varie et la numérotation aléatoire des éléments sont des inconvénients d'une connectivité explicite nécessitant plus de mémoire et d'espace disque, plus lent en temps de calcul, pas d'ordre entre la numérotation donc, plus difficile à déboguer. En revanche, ce type de maillage s'automatise facilement et il est très robuste. (Voir figure I.9) [12]

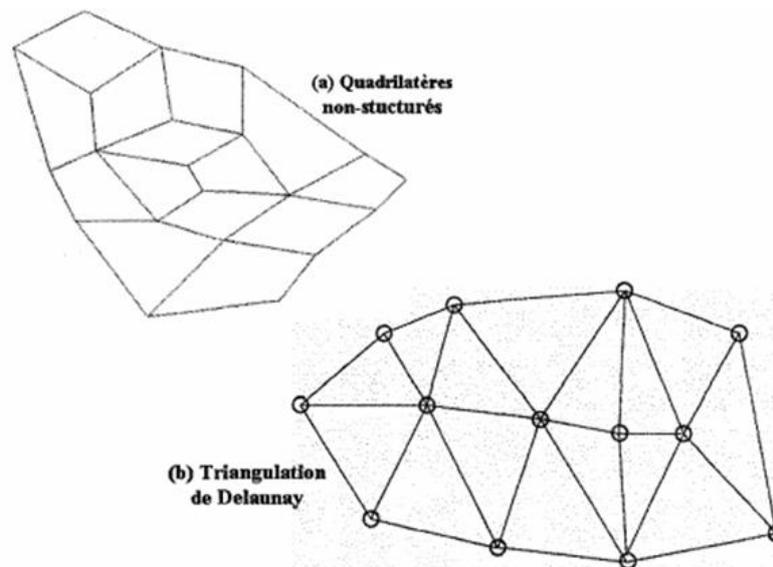


Figure I.9 : Maillage non-structuré.[12]

### I.3.1.3 Maillage hybride

Les maillages hybrides comprennent plusieurs types d'éléments, par exemple, une combinaison d'éléments triangulaires et quadrangulaires représenté dans la figure I.10. L'élément tétragonal couvre la zone proche de la surface de contact et les triangles séparent le reste du champ d'analyse. Ce dernier point confirme la sélection des quatre éléments pour améliorer la précision. Le réseau hybride comprend également des zones structurées et des zones non structurées. Il y a des moments où la grille est désorganisée pour mieux représenter les limites ou pour améliorer la précision en réduisant la taille des éléments au fur et à mesure qu'ils sont affinés localement. (Voir figure I.10)[12]

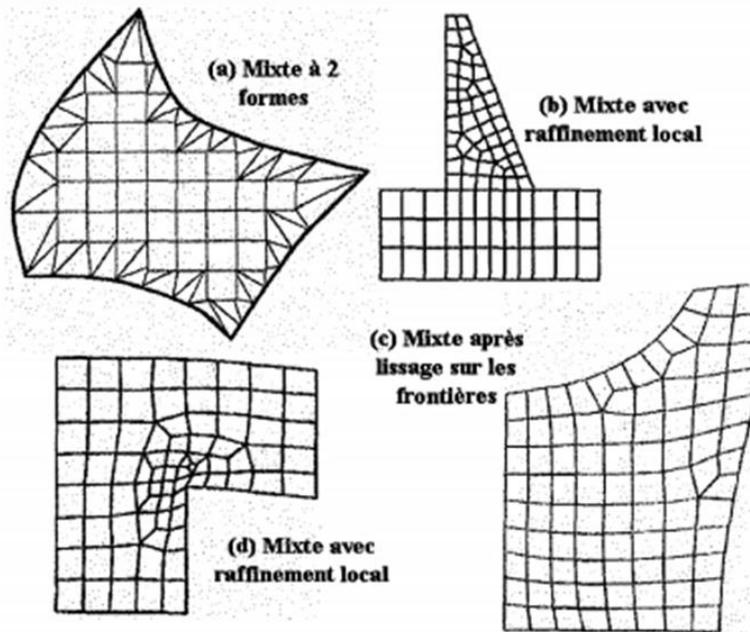


Figure I.10 : Maillage hybride.[12]

### I.3.2 Modèles de représentation en CAO

Il existe de nombreuses utilisations de la CAO et l'utilisation la plus courante peut être dans la modélisation partielle. Cette modélisation permet la visualisation des pièces en trois dimensions. De plus, certains paramètres physiques liés à la géométrie de la pièce peuvent être calculés et quantifiés, tels que : Volume, masse, inertie, centre de gravité et volume. Par conséquent, la technologie peut vérifier que certaines propriétés physiques de pièces typiques répondent aux attentes des clients. Sinon, des modifications peuvent être apportées avant la fabrication du premier prototype, ce qui peut réduire considérablement les coûts de construction.[13]

Il existe 3 différentes représentations en CAO :

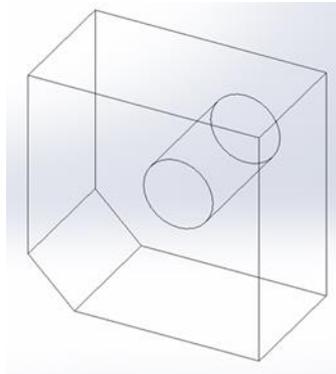
- la représentation par fil de fer (filaire)
- la représentation surfacique (BRep)
- la représentation solide (volumique).

#### I.3.2.1 La représentation de filaire

##### a) Définition

Les autres appellations de cette modélisation sont linéiques, treillis ou fil de fer. C'est le premier niveau de modélisation dans l'espace. Elle utilise les mêmes entités géométriques que la 2D, en y ajoutant la troisième dimension. Elle est donc basée sur des points et des

lignes. L'objet est décrit par ses sommets (points) et ses arêtes (lignes qui relient ces sommets). Pour gérer la notion de pièce, on ne pourra utiliser que des points appartenant aux arêtes : ce sont les seuls repérables. (Voir figure I.11)[13]



**Figure I.11** : Représentation par fil de fer

## **b) Avantages**

Cette modélisation permet une représentation réaliste des objets dans l'espace. Réduire les erreurs d'interprétation (dus aux informations supplémentaires de la troisième dimension). Par conséquent, il peut gérer des formes géométriques plus complexes que la 2D.[13]

## **c) Inconvénients**

- Cette modélisation n'intègre pas la notion de surface et de volume, bien que la visualisation obtenue puisse donner des idées.

Par conséquent, les lignes cachées ne sont pas automatiquement éliminées. Cela doit être fait manuellement par l'utilisateur.

- Cela crée également une confusion dans la compréhension de la géométrie de la pièce.

- Bientôt, nous avons eu des problèmes pour lire le dessin. A partir d'une certaine densité de trait (généralement atteinte très rapidement) cela devient très difficile.[13]

### **I.3.2.2 La représentation par les frontières (BRep)**

Il s'agit d'une représentation similaire à la modélisation de surface avec deux techniques différentes (représentation à facettes et représentation exacte des limites). Dans le Boundary Representation (BRep) les frontières de l'objet sont clairement décrites : Ces informations sont très utiles en CAO pour le calcul rapide de la tenue de route, de la qualité, du centre de gravité... ; Ils sont également utiles en infographie car la plupart des algorithmes de visualisation supposent tous que la surface de l'objet est connue. Le modèle doit contenir deux types d'informations : des informations topologiques (la manière dont les informations géométriques sont liées les unes aux autres).

Pour valider le modèle BRep, chaque face doit vérifier un certain nombre d'attributs pour s'assurer que l'objet est reconnu comme un volume qui occupe une partie de l'espace et son homogénéité. En fait, le modèle BRep décrit la limite comme la juxtaposition de plusieurs gouvernes. Chaque surface est constituée d'une surface délimitée par au moins un contour fermé et orienté.

Chaque périmètre est constitué d'une série d'arêtes. Chaque côté a une courbe d'appui délimitée par deux sommets. [11]

L'utilisation de surfaces planes (triangles, polygones, etc.) pour modéliser des objets nécessite une approximation des polygones. On obtient un ensemble des faces représentées par leurs bords et leurs coins, la modélisation est dite facettée.

L'inconvénient de cette méthode est sa faible performance. Les objets avec des surfaces non planes ne peuvent pas être précis, leur approximation polygonale est ambiguë et le nombre d'entités planaires générées est directement lié à la précision de l'interpolation requise. Afin de décrire avec précision des surfaces non traditionnelles (plans, surfaces cylindriques...), de nombreux systèmes de CAO utilisent des surfaces complexes, bien que leur traitement soit plus complexe. (Voir figure I.12)[11]

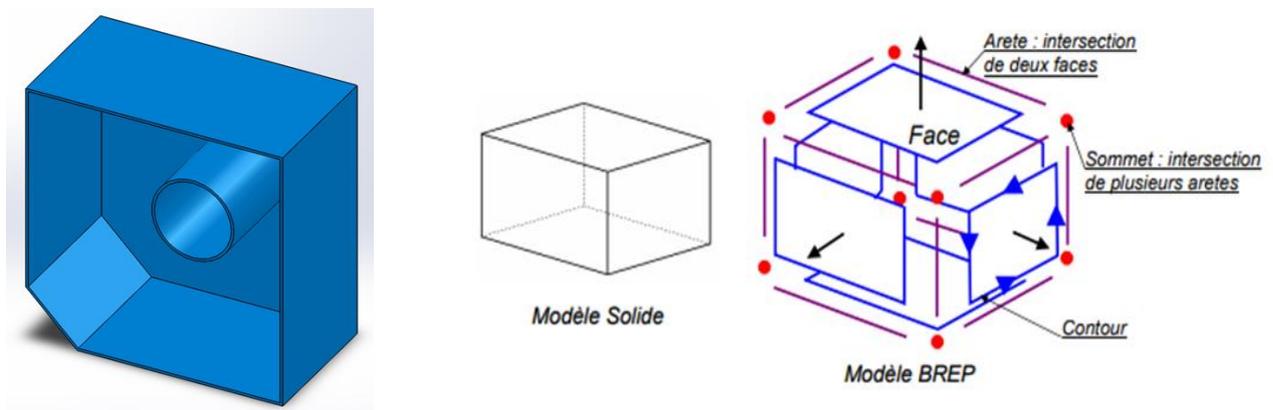


Figure I.12 : Représentation surfacique [11]

#### a) Les avantages de ce modèle

- Le modèle est facile à décrire, visualiser et transformer géométriquement ;
- C'est aussi unique (pour les pièces mécaniques il n'y a qu'un modèle BRep). [11]

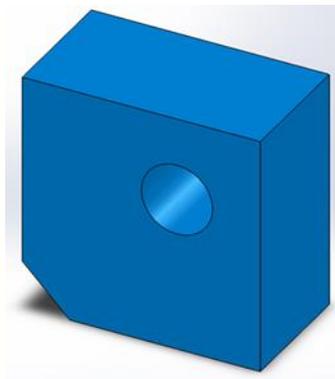
#### b) Les inconvénients de ce modèle

- Il est difficile d'effectuer des opérations logiques (en raison du grand nombre de faces qui composent l'objet initial).
- Manque d'algorithmes généraux (la plupart des opérations arithmétiques liées au modèle).

-Une limite est un volume composé de plans qui sont à leur tour délimités par des segments de ligne droite pour faciliter les opérations logiques). [11]

### I.3.2.3 La représentation solide (volumique)

Il y a eu de nombreux travaux sur les méthodes de volume dans les années 1970. Il s'agit de la méthode de représentation volumique la plus couramment utilisée, permettant aux concepteurs de calculer les propriétés mécaniques du solide, d'effectuer des vérifications d'interférences, de créer des vues complètes ou en coupe des pièces et de supprimer les lignes cachées. C'est la représentation la plus complète et la plus sophistiquée. Ce qui diffère de la représentation surfacique est la possibilité de distinguer l'intérieur de l'extérieur d'un volume donné. (Voir figure I.13)[14]



**Figure I.13 :** Modélisation solide

Les principales techniques de modélisation utilisées dans le volume sont :

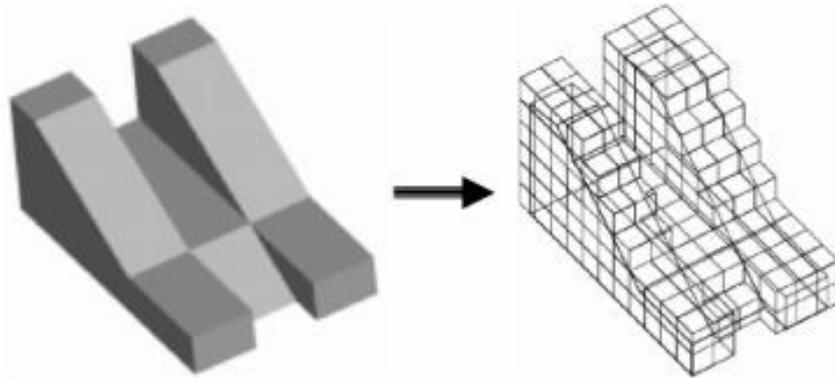
- Modélisation par occupation de l'espace.
- Méthode CSG.

Le corps se caractérise par ses côtés uniformes en trois dimensions, ses limites (le corps occupe un espace limité) et les limites qui définissent l'intérieur et l'extérieur du volume. Les modèles à l'échelle les plus importants sont : la représentation de l'occupation de l'espace, la représentation des limites, la représentation CSG et la représentation hybride.[14]

#### **A) Modélisation par occupation de l'espace**

Les objets sont représentés par une série de cellules occupées par le volume corporel dans l'espace. Cela peut être de n'importe quelle taille, mais il est très courant d'utiliser un cube de taille constante (Figure I.14). Ces cubes, appelés voxels, sont de petits éléments avec un volume spécifique. Son emplacement est principalement déterminé à l'aide de coordonnées de

point 3D. Les objets sont représentés par des matrices triangulaires (x, y, z) appelées matrices spatiales, qui sont généralement ordonnées, et l'arbre correspond à l'ordre dans lequel les objets sont construits. Cette méthode est facile à mettre en œuvre. Il est pratique de calculer les propriétés physiques de l'objet et d'effectuer des opérations logiques.[14]



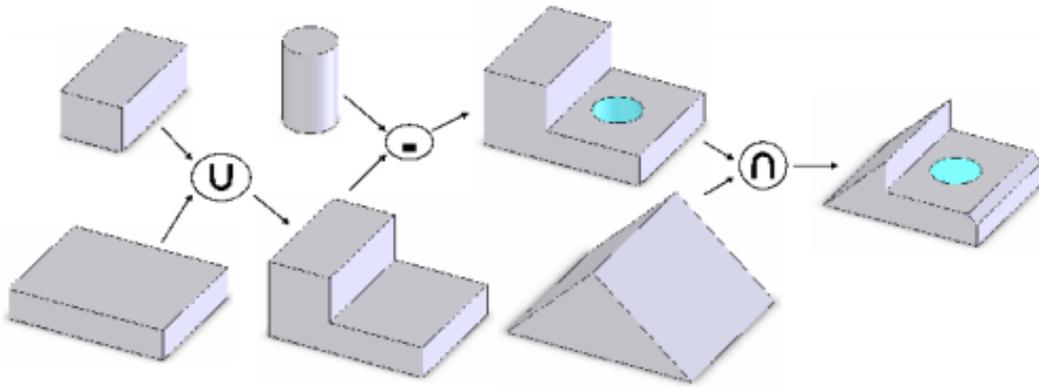
**Figure I.14** : Modélisation par occupation de l'espace[14]

### **B)La composition arborescente du solide(CSG)**

Il s'agit d'une représentation appelée représentation de la géométrie solide construite (CSG). C'est une conception semi-assemblée. L'entité est définie par un arbre (Figure I.15). Les principes de base utilisés correspondent à la forme finale de représentation des objets : à partir d'éléments de base solides ou simples (cubes ,Cylindres, sphères, cônes, etc.) sont créés à l'aide d'opérations logiques (union, intersection, différence) et de transformations géométriques. Ce modèle a ensuite été développé à l'aide d'un logiciel de la CAO à l'arbre de spécifications contenant l'historique de création du produit. Cet "objet" signifie que les solides décrits dans le langage d'ingénierie et technique peuvent être stockés dans la base de données telle qu'elle a été conçue. Il définit l'arbre de construction, qui précise précisément l'objet de base, sa position dans l'arbre de construction et ses paramètres de position.

#### **a) Avantages du modèle CSG**

- Facile à créer.
- Facile à ranger.
- Facile à vérifier.



**Figure I.15 :** Représentation d'une Composition arborescente d'un solide [14]

#### b) Inconvénients du modèle CSG

- Il est difficile de calculer les propriétés physiques et géométriques d'objets complexes.
- Il est difficile d'effectuer certaines conversions (orientation arbre CSG Tels que l'agence transfrontalière).[14]

### I.4. Format des fichiers

Les formats de fichiers propriétaires sont ceux qui ne sont lisibles que par leur propre logiciel ou d'autres logiciels autorisés. Cette utilisation de formats propriétaires peut entraver l'interopérabilité si les intervenants de l'équipe du projet utilisent différents types de logiciels. Le problème du format de fichier ne se pose en fait que dans le cas où l'on désire envoyer ce fichier à quelqu'un. Le problème rencontré est alors souvent le fait que la personne ne possède pas le même logiciel et ne peut donc pas lire le document. Dans ce cas, il vaut mieux enregistrer le document dans un format partagé par beaucoup de logiciels.

L'autre problème rencontré souvent quand on envoie ou reçoit un fichier est le nom qui lui a été donné. Il convient en effet de respecter certaines règles quand on donne un nom à un fichier. Les ordinateurs et les protocoles de transmission (mail, internet) se basent en partie sur le nom du fichier pour savoir comment le traiter. L'extension est alors très importante. L'extension, ce sont les quelques lettres, en général 3, qui se trouvent à la fin du nom, précédées d'un point.

Chaque logiciel a sa manière propre d'encoder les informations. Certaines manières d'encodage ne sont lisibles que par le logiciel lui-même.

D'autres sont lus par d'autres logiciels du même type, puis quelques formats de fichiers sont lus par tous les logiciels de la famille.[15]

Dans notre travail on a utilisé plusieurs formats qui sont définis ci-dessus :

**a) Format IGES :** Initial GraphicsExchange Spécification (IGES) est un format d'exportation de données graphiques : IGES est directement importable dans les logiciels de CAO. Ce type de format d'export présente une universalité assez forte dans le domaine des CAO 3D orientées surfacique et filaire.[16]

**b) Format STEP :** Standard for Exchange of Product Le format de fichier STEP 3D (step , stp) est un format d'échange de données appliqué dans l'industrie de la conception assistée par ordinateur (CAO). Il est principalement utilisé pour transférer des conceptions mécaniques et architecturales du monde réel entre différents outils logiciels de CAO.[17]

Et on a aussi utilisé d'autres formats comme :

**c) Format obj :** L'extension de fichier OBJ est connue en tant que fichier d'objet Wavefront 3D qui a été développé par Wavefront Technologies. Il s'agit d'un format de fichier utilisé pour un objet en trois dimensions contenant les coordonnées 3D (lignes polygonales et points), les cartes de texture et d'autres informations de l'objet. Il contient un format d'image 3D standard qui peut être exporté et ouvert par plusieurs programmes d'édition d'image 3D. Les fichiers objets peuvent être en format ASCII (obj) ou au format binaire (mod) ne contient cependant pas de définitions de couleurs pour les visages. En raison de leur format, ils sont lisibles par l'homme. Il prend en charge les objets polygonaux et des objets de forme libre. Géométrie polygonale utilise des points, des lignes, et fait face à définir des objets en forme libre géométrie utilise des courbes et des surfaces. Les fichiers au format OBJ peuvent être ouverts avec Autodesk MeshLab dans Microsoft Windows, Mac OS et Linux.[18]

**d) Format ply :** Polygon File Format est un format de fichier informatique connu sous le nom de Polygone File Format (Format de Fichier de Polygones ) ou le Stanford Triangle Format. Le format fut principalement conçu pour stocker des données tridimensionnelles provenant de scanners 3D. Il consiste en une description relativement simple d'un objet unique comme une liste de polygones nominalement plats.

Une grande variété de propriétés peuvent être stockées, telles que couleur et transparence, normales aux surfaces, coordonnées de texture. Le format permet d'avoir des propriétés différentes pour le devant ou l'arrière d'un polygone.[19]

**e) Format stl :** STereo-Lithography un fichier STL stocke des informations sur les modèles 3D. Ce format décrit uniquement la géométrie de surface d'un objet tridimensionnel sans représentation de couleur, de texture ou d'autres attributs de modèle courants. Ces fichiers sont généralement générés par un programme de conception assistée par ordinateur (CAO), en tant que produit final du processus de modélisation 3D. (STL) est l'extension de fichier du format de fichier STL. [20]

Il existe d'autres formats secondaires comme les Formats :

**3ds** (3DStudioMax), **vrml** (Virtual Reality Modeling Language) sont couramment utilisés par le navigateur Web pour générer des environnements de réalité virtuelle 3D, ainsi que des formats propriétaires très connus comme : prt ( ProE / creo part).

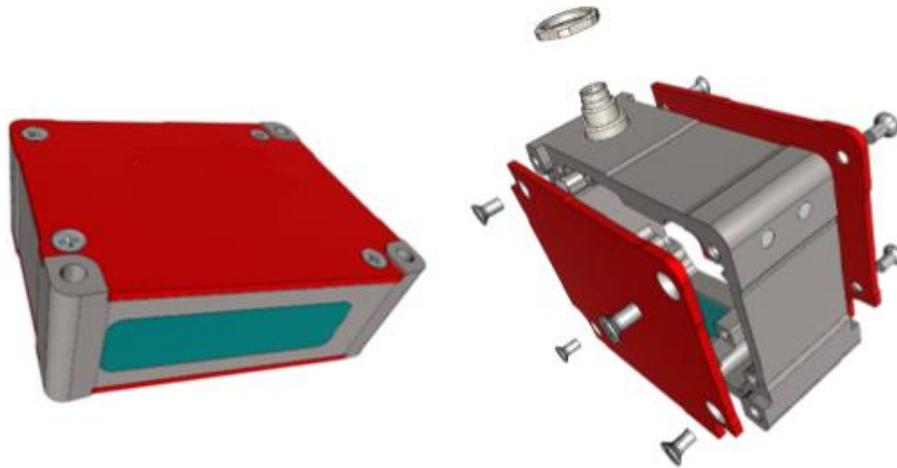
sldprt (solidworks),cgr (CATIAgraphics), et plusieurs d'autres formats. [21] [22]

## I.5. Application de la CAO

La CAO est utilisée dans plusieurs domaines et plusieurs travaux on va mentionner quelque travail d'application de CAO si dessous :

### I.5.1 Assemblage de composantes

Une autre application importante de la CAO est l'assemblage de composants. Un prototype virtuel peut être obtenu en assemblant plusieurs composants conçus individuellement. Ce dernier est une représentation informatique du produit. Dans la phase de prototypage virtuel, les prototypes physiques ne sont généralement pas réalisés dans le cadre du processus général de développement de nouveaux produits.(Voir figure I.16) [23]



**Figure I.16** : Exemple d'assemblage des pièces avec un modèle CAO [24]

### I.5.2 Mise en plans

Les logiciels de dessin assisté par ordinateur (CAO) existent depuis de nombreuses années et le logiciel AutoCad le plus populaire est profondément ancré dans les habitudes industrielles. Avec l'avènement des systèmes de CAO 3D et paramétriques, la CAO introduit une nouvelle dimension. En fait, la modélisation de pièces dans un environnement 3D peut générer des dessins techniques multi-vus presque automatiquement. La Figure I.17montre le

dessin technique de la pièce préfabriquée dans l'espace 3D. Avec une base de données commune, les modules CAO d'un même programme deviennent bidirectionnels, c'est-à-dire que lorsque le modèle 3D est modifié, les modifications apportées au dessin sont automatiquement mises à jour et vice versa. Ensuite, cela rend la gestion des avis beaucoup plus facile.[23]

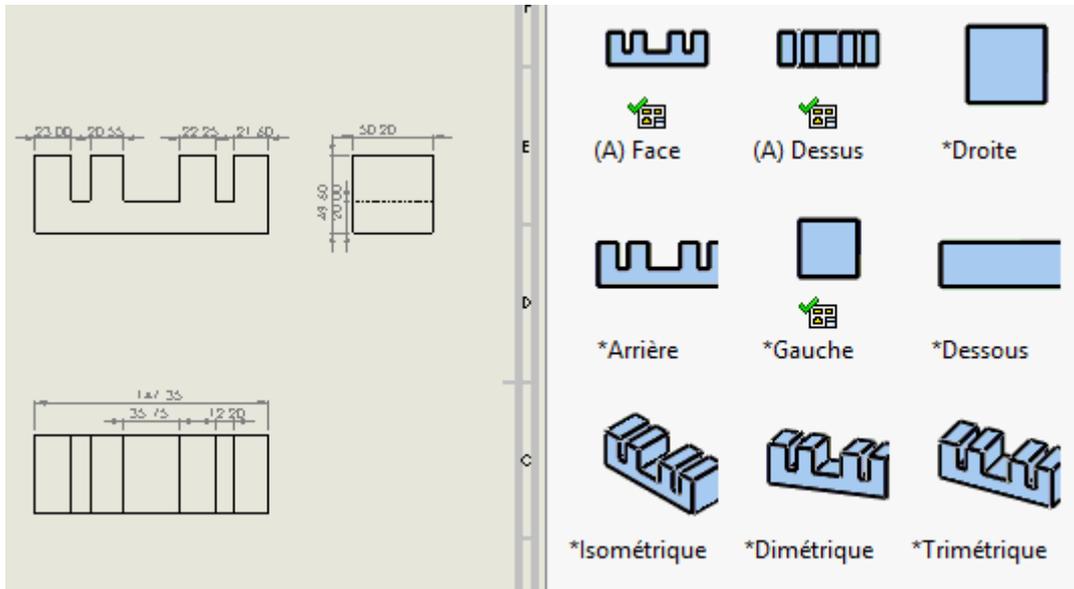


Figure I.17 : Mise en plan d'une pièce à l'aide de modèle CAO

### I.5.3 Fabrication assistée par ordinateur

La Fabrication Assistée par Ordinateur (FAO) permet d'établir des stratégies d'usinage afin de mettre en forme les pièces modélisées. La Figure I.18 montre les chemins d'outils qui ont été calculés par le module de FAO d'un système de CAO afin de mettre en forme une pièce de géométrie semi-cylindrique. La partie de gauche de la figure montre les trajectoires de l'outil de coupe pour une fraiseuse à trois axes, tandis que la partie de droite présente des trajectoires différentes pour une fraiseuse à cinq axes. Ces trajectoires d'outils seront ensuite converties à l'aide d'une interface appelée (post-processeur) et envoyées à une machine-outil à commande numérique.[23]

Dans notre mémoire c'est cette application que nous allons mettre en œuvre après la reconstitution de surfaces de la pièce mécanique étudiée.

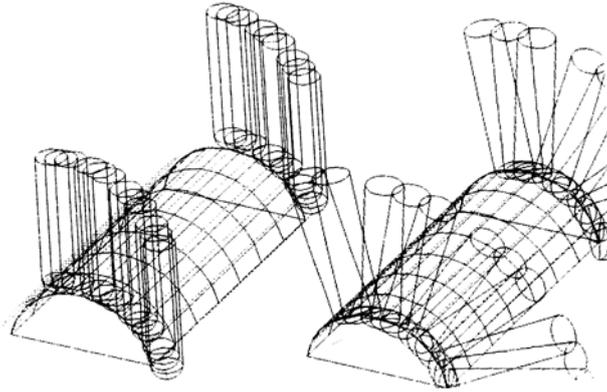


Figure I.18 : Détermination de trajectoires d'outils (3 axes / 5 axes) [23]

#### I.5.4 Prototypage rapide

Le prototypage rapide combine une série de technologies pour créer des pièces 3D basées sur des informations provenant de modèles géométriques.

Cette technologie est appelée « prototypage rapide » pour deux raisons principales. Premièrement, le terme « rapide » est utilisé car des pièces très complexes peuvent être fabriquées en quelques heures, ce qui est plus rapide par rapport aux autres méthodes de fabrication traditionnelles. Deuxièmement, cela s'appelle un « prototype » car les pièces fabriquées n'ont généralement aucune fonction. Cette technique est largement utilisée pour créer des modèles physiques de pièces pour une meilleure visualisation. (Voir figure I.19)[23]

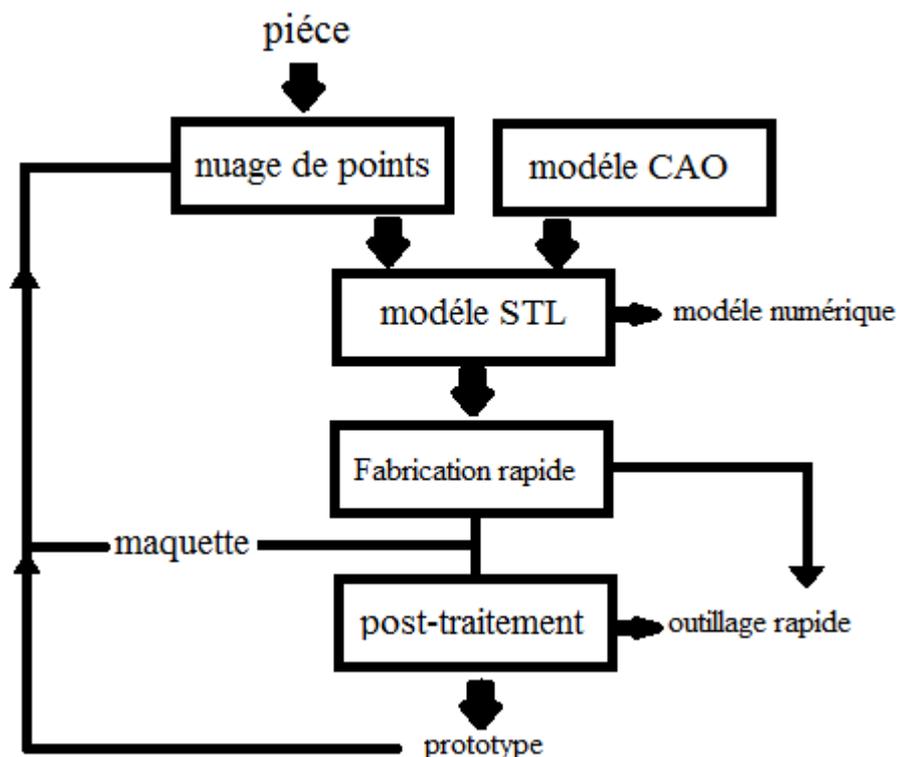
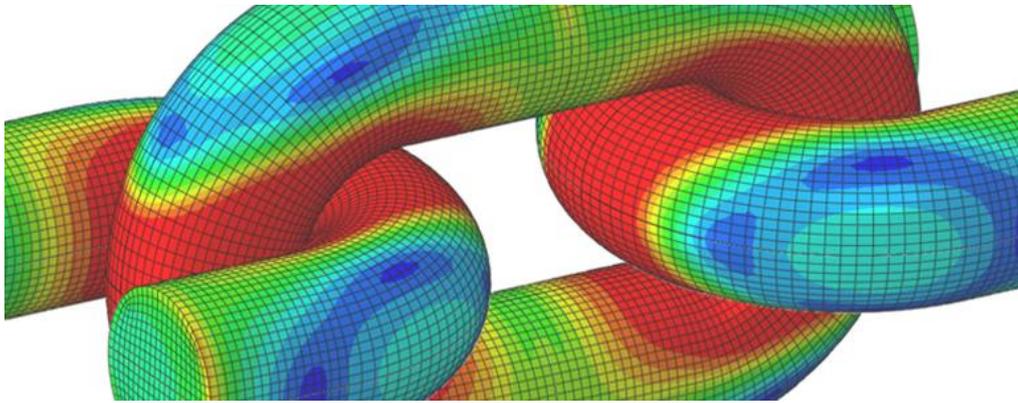


Figure I.19 : Processus de Prototypage Rapide [14]

### I.5.5 Analyses par éléments finis ou simulation

À l'aide du modèle CAO on peut faire des simulations sur le modèle obtenu de la pièce tel que la vérification des contraintes, vérification d'état du maillage et les calculs de transfert de chaleur... Cette simulation se base dans la majorité des cas sur l'analyse par éléments finis. L'analyse par élément finis c'est une méthode numérique qui divise la géométrie complexe étudiée en un réseau de nœuds, des caractéristiques et d'équations simples, formant un maillage. La figure I.20 montre une analyse par élément finis pour vérifier l'état des contraintes. L'analyse par élément finis peut être monodimensionnelle, bidimensionnelle ou tridimensionnelle. La Résolution des problèmes à l'aide d'éléments finis permet de mieux visualiser et comprendre le comportement de pièces ou de composants dans des conditions établies avant la fabrication.[25]



**Figure I.20** : simulation à l'aide d'un modèle CAO pour la vérification des contraintes [26]

### I.5.6 L'étude cinématique (étude du mouvement)

Des analyses cinématiques peuvent être exécutées à partir de l'assemblage de pièces qui sont mobiles les unes par rapport aux autres. La partie de gauche de la figure montre une vue générale d'une suspension d'automobile, tandis que les parties centrales et de droite illustrent les positions extrêmes des pièces de l'assemblage. Avec de telles analyses cinématiques, il devient possible de vérifier les contacts entre deux pièces qui pourraient survenir lors du fonctionnement en plus d'estimer les forces d'inertie engendrées lors du mouvement des composantes. (Voir figure I.21)

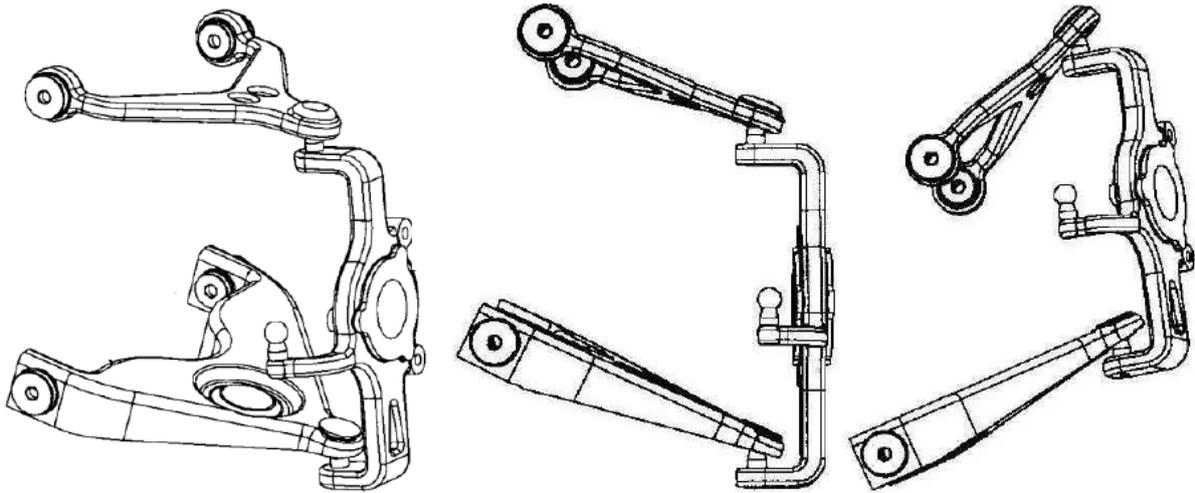


Figure I.21 : Analyse cinématique d'une suspension d'un véhicule

## I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une définition de l'ingénierie inverse qui constitue le domaine dans lequel s'inscrit notre thématique de reconstruction de surfaces. Nous avons défini un grand nombre de concepts liés à cette thématique pour faciliter la compréhension du travail des chapitres suivants. Nous allons voir par la suite plus en détails le processus de reconstruction de surfaces en commençant par l'acquisition des données jusqu'à l'étape finale d'obtention du modèle CAO de la pièce mécanique (physique) étudiée.

**CHAPITRE II**  
**RECONSTRUCTION DES**  
**SURFACES**

**II.1 Introduction**

Comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, la reconstruction de modèle a trois types d'applications : l'application de réplication ; l'application du contrôle de la qualité et l'application de la refonte et de la modification. Diverses méthodes de reconstruction de modèles ont été explorées pour convertir les données mesurées en modèles géométriques. Elles sont principalement divisées en deux types : les méthodes basées sur les surfaces et les méthodes basées sur les caractéristiques. En comparaison, les méthodes basées sur les surfaces sont examinées plus en profondeur.

La plupart des techniques de l'ingénierie inverseront basées sur les surfaces pour la reconstruction de modèles géométriques. Les procédés basés sur les surfaces sont particulièrement adaptés aux produits constitués de surfaces de forme libre, par exemple les pièces de contour d'avions et d'automobiles.

Nous allons voir dans ce chapitre en détails le processus de reconstruction de surfaces ainsi que les étapes clés de celui-ci.

**II.2 Processus de reconstruction des surfaces**

Aujourd'hui, les données de nuages de points servent de lien entre différentes méthodes de numérisation et la représentation CAO. Ils sont utilisés ainsi que comme base de comparaison dans les procédures d'inspection des premières particules des produits coulés. Le contour 2D est le paramètre fondamental de toutes les entités, par conséquent, nous introduisons d'abord la méthode détaillée de reconstruction de contour 2D. A partir de ce départ en vas extrayons les données de nuage des points, leur objectif principal est la segmentation des données, pour subdiviser la représentation de l'objet en petites régions facilement utilisable pour ajuster des surfaces mathématiques (Voir figure II.1), le développement de règles pour la reconstruction rapide du modèle CAD de surface basée sur les fonctionnalités extraites et enfin, les implémentation du logiciel de modélisation 3D associé.

En plus et avec le développement de la technologie, le processus de reconstruction devenue plus facile avec des autres méthodes d'acquisition des données que nous verrons.



**Figure II.1** : Un modèle Engrener.[27]

### **II.3 Méthodes d'acquisition des données**

Les objets que les humains construisent ne sont pas arbitraires: les formes de la plupart des objets normaux, lorsque nous utilisons des formes standard et non libres, suivent les conventions issues de la tradition, de l'utilité, esthétique ou conception technique. Comme un exemple les designs des coques des véhicules.

Donc on doit utiliser des méthodes qui nous aident le maximum de prendre la géométrie du modèle au minimum 85 %.

Parmi les méthodes d'acquisition :

- Tomographie
- Photogrammétrie
- scanneur Laser
- Machines à Mesurer Tridimensionnelle (MMT)

#### **II.3.1 Tomographie**

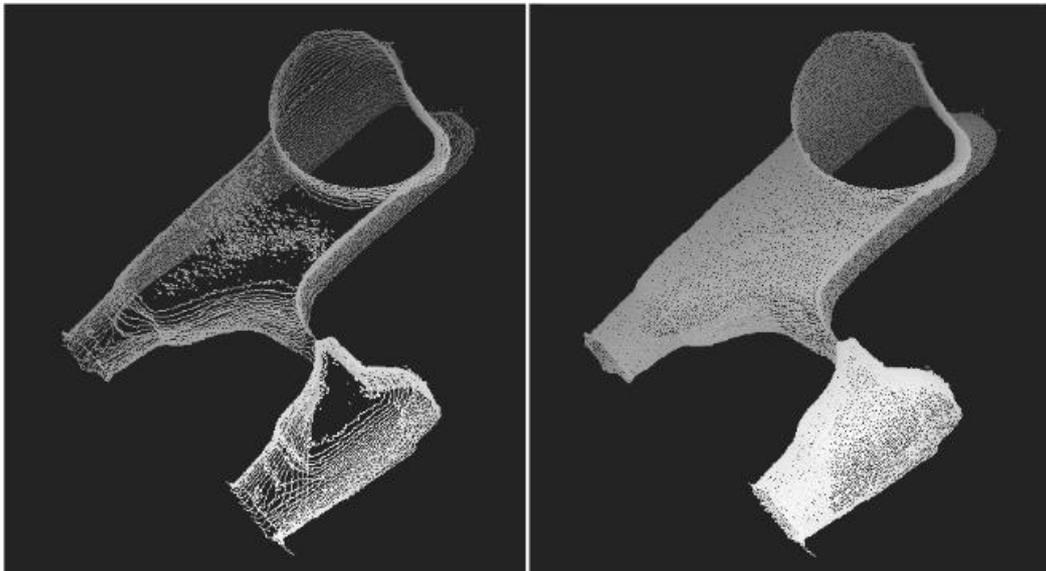
Ces dernières années, la tomodensitométrie industrielle a eu sa principale application dans les examens scientifiques. Les domaines d'intérêt spécifiques étaient la détection des défauts, l'analyse des défaillances.

Les mesures dimensionnelles des caractéristiques géométriques non accessibles, l'inspection des assemblages ou les enquêtes statistiques sur les propriétés des matériaux comme la distribution de la densité. Des tranches uniques ont été prises à des endroits bien définis et utilisées pour une analyse plus approfondie.

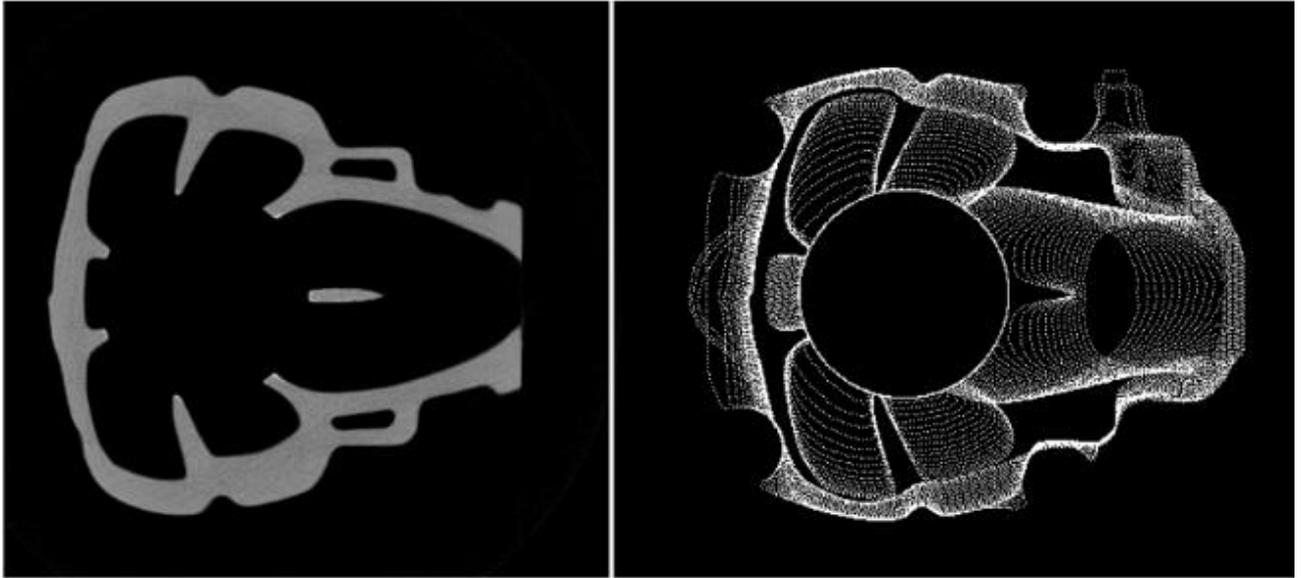
Aujourd'hui, l'application la plus importante de la tomodensitométrie est devenue la numérisation à des fins de numérisation 3D. Tout d'abord, les industries de l'automobile et de la moto ainsi que leurs fournisseurs et la technologie médicale montrent un très fort intérêt pour les nouvelles possibilités qu'offre (L'ordinateur tomographie). En utilisant cette nouvelle technologie, il est possible de réduire le délai de mise sur le marché pour le développement de nouveaux produits. Ainsi, les entreprises peuvent réaliser des avantages concurrentiels substantiels.

Considérez les données de tomodensitométrie comme une fonction mathématique qui attribue une valeur de densité spécifique à chaque élément de volume. La surface 3D de l'objet est une iso surface composée de points de même densité (même seuil). En utilisant des méthodes de traitement d'images 2D, un contour défini par un point peut être extrait de chaque tranche. L'empilement de ces contours 2D ponctuels produira un nuage de points 3D.

Un inconvénient de cette méthode est qu'elle produit l'effet que la surface est presque parallèle à l'espace de la coupe tomographique. La véritable segmentation 3D élimine ce rétrécissement. L'algorithme nouvellement développé fait référence aux tranches inférieure et supérieure et utilise ces informations pour calculer l'interpolation linéaire de la valeur de densité. Le nuage de points généré sera une approximation de l'iso surface avec une précision inférieure au pixel.(Voir les figures II. 2 et II.3)[28]



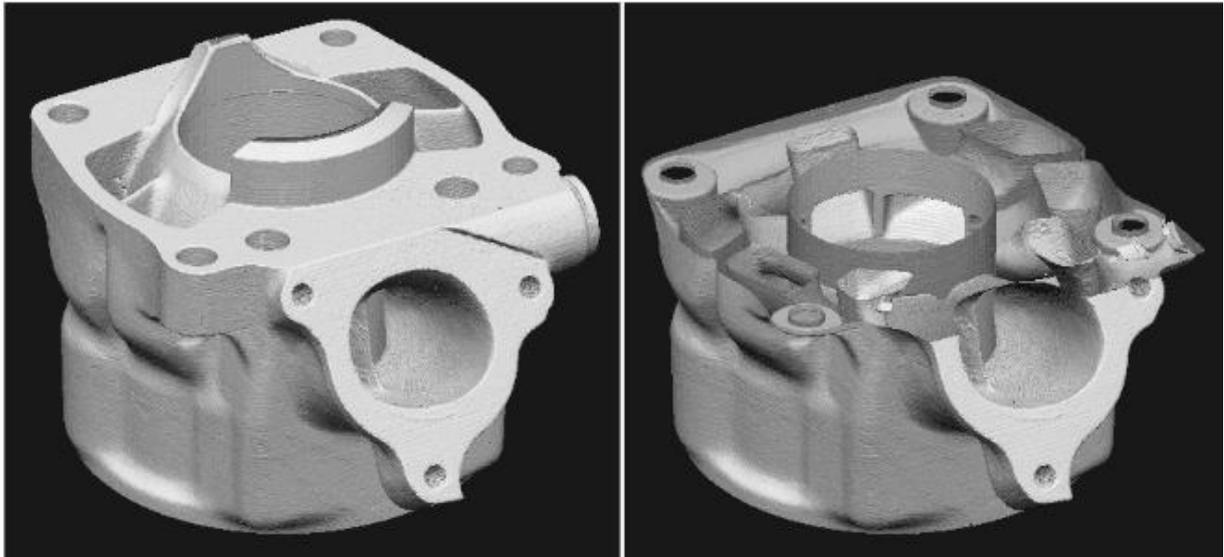
**Figure II.2** : Génération de nuages de points: méthode 2D (à gauche) et méthode 3D (à droite).[28]



**Figure II.3** : Cylindre de moteur de moto: tomogramme unique et contours de certaines tranches.[28]

La méthode d'obtenir un modèle CAO à partir de données CT via l'interface IGES était un processus très étendu. À ce moment du projet, c'était la méthode la plus simple et la plus sûre. Seul un logiciel commercial (de Matérialise [www.materialise.com](http://www.materialise.com)) était disponible, à l'exclusion des outils du fabricant CT qui dispose d'un logiciel pour gérer les données CT et les exporter dans des formats neutres (IGES, STEP, etc.).

Le développement de logiciels d'ingénierie inverse a fait de grands progrès au cours des dernières années. La philosophie de l'industrie du logiciel consistant à n'utiliser que des formats géométriques natifs (tels que NURBS, B-spline rationnelle non uniforme, Bézier, etc.) a changé. Ainsi, il est désormais possible de générer des trajectoires d'outils FAO et des modèles finis basé sur le format de géométrie triangulaire (STL). Par conséquent, on s'attend à ce que la chaîne de processus inverse fasse des progrès significatifs au cours des prochaines années.



**Figure II.4** : Cylindre du moteur de la moto: visualisation 3D du tomogramme entier et coupé.[28]

La tomographie par ordinateur est très appropriée pour générer des données 3D de pièces moulées complexes. En tant que matériau le plus largement utilisé dans la production de moteurs, l'aluminium peut facilement être traversé jusqu'à des murs de 300 mm d'épaisseur par une source de rayons X de 450 kV.

La précision atteignable sur un objet d'un diamètre de 300 mm est d'environ 0,2 mm. Étant donné que la surface est segmentée en une série de sous-pixels, la précision peut même être meilleure. Mais jusqu'à présent, il n'y a pas eu d'enquête systématique sur cette question.

La génération d'un nuage de points pour la première inspection est devenue l'activité principale du système CT. À mesure que de plus en plus de fabricants de moteurs, de fonderies et d'autres entreprises appliquent cette nouvelle technologie, cette proportion pourrait augmenter à l'avenir. Le temps gagné en travaillant de cette manière se traduira par un avantage concurrentiel dans les conditions actuelles du marché.

La tomodensitométrie peut devenir un outil important dans le domaine de la simulation et de l'analyse par éléments finis.

Si les calculs sont basés sur des données collectées à partir d'objets physiques réels plutôt que sur des modèles CAO théoriques, les résultats des calculs sont plus fiables.[28]

### II.3.2 Photogrammétrie

#### II.3.2.1 Définition

La photogrammétrie est une technique permettant de mesurer des objets réels à travers des photos. C'est une mesure sans contact basée sur le principe de la triangulation. Cela permet la mesure des points 3D en prenant des photos à partir de plus de deux endroits différents. La photogrammétrie a été utilisée pour la première fois par l'officier français Aimé Laussedat en 1851 (il a développé le premier appareil et méthode photogrammétrique, qu'il considérait comme une méthode photogrammétrique Initiateur).

Aujourd'hui, la technologie de la photogrammétrie est utilisée dans de nombreux domaines, par exemple :

- Topographie.
- Génie civil (reconstruction de modèles CAO de bâtiments).
- Bâtiment et préservation historique.
- Contrôle qualité (La photogrammétrie peut également être utilisée comme outil de contrôle qualité pour les fabricants de tuyaux. Toute modification de la forme du produit peut être traitée dans l'atelier du fabricant, où le travail est effectué à un coût plus élevé. Efficace).
- Aviation (inspection d'outils, l'ingénierie inverse des pièces par des fabricants de pièces de rechange).
- Voitures (pour mesurer l'efficacité du crash test).
- Construction et réparation navale (représentant l'une des principales applications industrielles de la photogrammétrie aux États-Unis. La plupart des chantiers navals ont adopté des techniques de mesure avancées pour contrôler les coûts et raccourcir davantage les cycles de production).

La technologie de photogrammétrie peut être utilisée dans les processus de fabrication en ligne ou hors ligne. Ils peuvent être appliqués au processus de développement de produits. Certaines entreprises utilisent des méthodes de photogrammétrie pour générer des systèmes de coordonnées de référence de haute précision, en particulier lors de la mesure de très gros objets ; cela garantit des mesures très précises et fournit de nombreuses informations lors de la numérisation de degrés de liberté grands et complexes (par exemple : modèle de voiture global avec une précision de 0,15 mm)].

Le résultat du processus de photogrammétrie peut être : des coordonnées de point 3D, Carte topographique, photo corrigée.[29]

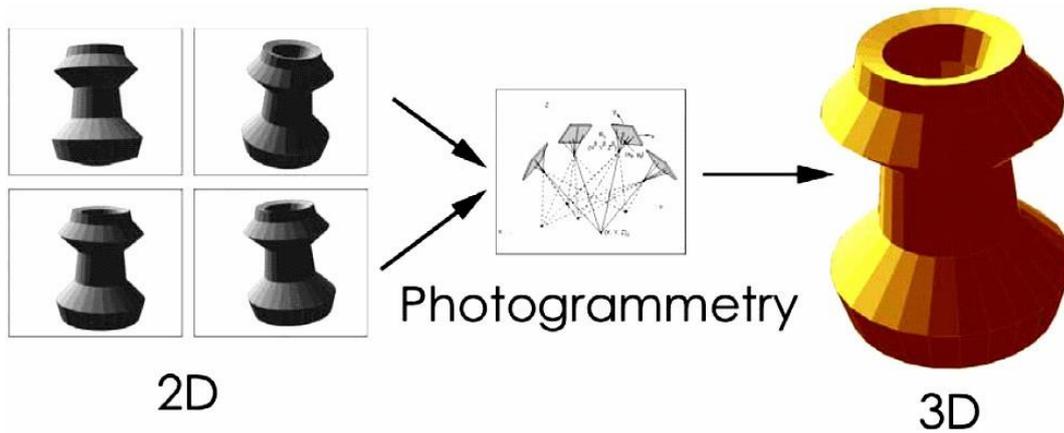


Figure II.5 : Représentation d'un processus de photogrammétrie.[29]

Les techniques de photogrammétrie peuvent être classées comme suit (Voir Figure II.6)

La photogrammétrie lointaine (surfaces de m<sup>2</sup>) est utilisée pour produire des cartes topographiques, pour reconstruire la forme des bâtiments, etc.

Les techniques de proximité et de très près sont préférées pour la technique des applications industrielles. Dans ce cas, les dimensions de l'objet physique et de ses caractéristiques peuvent varier entre 1 cm<sup>2</sup> et 1 mm<sup>2</sup>.

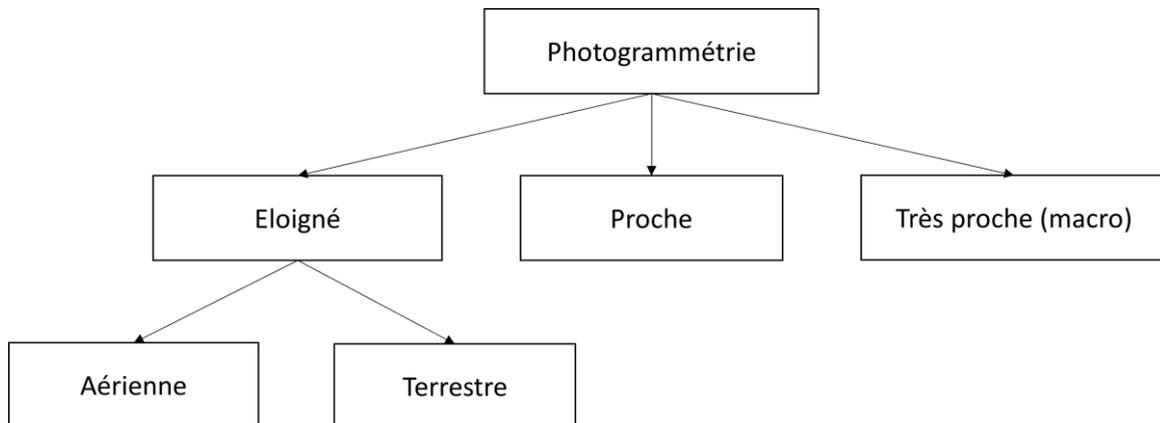


Figure II.6 : Diagramme de Classification des techniques de photogrammétrie.[29]

### II.3.2.2 Système et logiciel

Les méthodes passives basées sur l'image (par exemple la photogrammétrie ou la vision par ordinateur) acquièrent des mesures 3D à partir d'images uniques, elles utilisent la géométrie projective et elles sont très portables.

Le système utilisé est basé sur un appareil photo numérique (résolution de 4 Méga pixels), un logiciel basé sur la photogrammétrie « Photo modeler » et un logiciel de CAO de post-traitement (Raindrop Geomagic Studio). Une attention particulière doit être portée au réglage

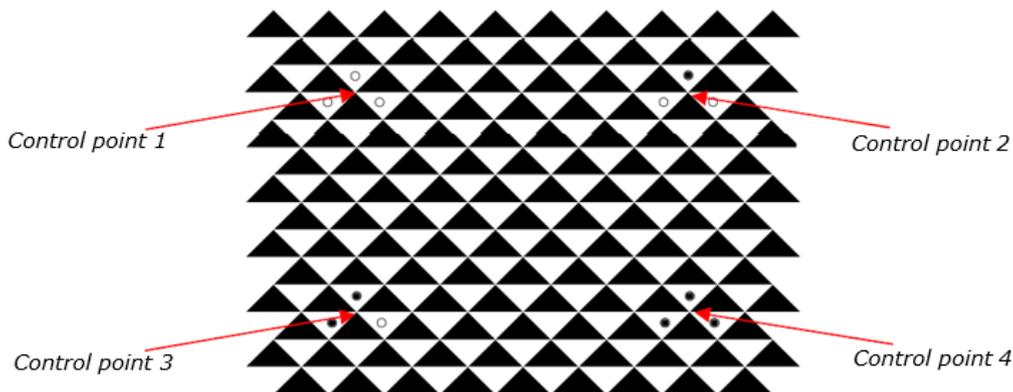
du processus. L'appareil photo doit être placé sur un trépied. L'environnement doit être assez léger.

La qualité d'image utilisée pour la reconstruction est une exigence de base pour les meilleurs résultats en utilisant les techniques de photogrammétrie. Plus la photo est nette, meilleur est l'effet.

Par conséquent, des images haute résolution (minimum 1200x1900 pixels) sont nécessaires. Si certaines techniques sont utilisées, comme un fond blanc, une cible codée sur l'objet, et des photos prises tous les 30-40 degrés, l'effet photogrammétrique sera très bon. [29]

### II.3.2.3 Calibrage de la caméra

Il est très important pour la fiabilité de l'ensemble du projet que la distance focale et la distorsion de l'objectif puissent être obtenues en calibrant la caméra en utilisant le modèle de calibrage fourni avec Photo modeler. (Voir figure II.7)



**Figure II.7 :** Représentation d'un Modèle d'étalonnage. [29]

Le processus d'étalonnage fonctionne si six images ou plus sont prises sous différents angles d'une grille de points dense. Le calibre de caméra a besoin de la distance entre les points de contrôle 1 et 4 sur le motif projeté ou imprimé (phase de mise à l'échelle). Il est important de souligner que le motif doit remplir autant que possible la photographie. L'utilisateur doit faire attention à inclure dans chaque image tous les points de contrôle. [29]

### II.3.2.4 Précision

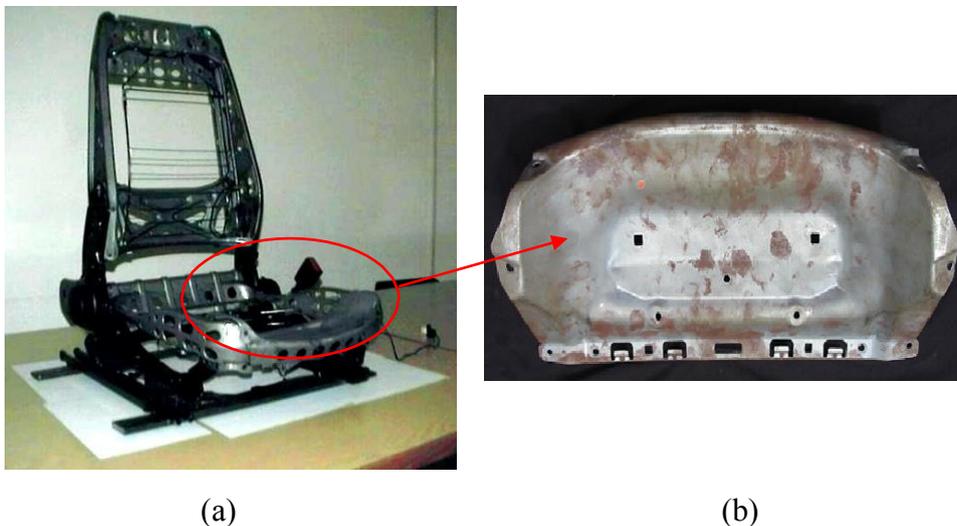
Les méthodes photogrammétriques sont généralement considérées comme inexactes. Le système MMT permet d'obtenir un point de mesure d'une précision proche du  $\mu\text{m}$ . Au lieu de cela, il est normal d'utiliser une méthode basée sur la photogrammétrie pour obtenir une précision inférieure à 1 mm, mais des techniques spéciales peuvent être utilisées pour obtenir

des points avec une précision plus élevée. Par conséquent, si une très grande précision n'est pas requise, les techniques à courte portée peuvent être une solution appropriée pour la mesure et/ou la reconstruction du modèle. « Photo Modeler » offre la possibilité d'obtenir une précision de taille d'objet jusqu'à 1:2000 ou plus, donc pour des objets jusqu'à 10 m de taille, des coordonnées 3D avec une précision de 5 mm à 95% peuvent être générées. Si d'autres facteurs sont pris en compte pour une bonne géométrie et un étalonnage correct de la caméra, il est possible d'atteindre une précision de 1:25 000 ou plus dans des projets qui sont complètement ou presque complètement achevés à l'aide de techniques spéciales.[29]

### II.3.2.5 Un cas pratique

Afin d'évaluer l'adéquation de la photogrammétrie dans le domaine industriel, certaines parties de l'armature du siège auto ont été testées.

Le côté gauche de la figure II.8 montre le squelette complet du siège auto, tandis que le côté droit montre les composants de test. Ce composant a d'abord été acquis par un scanner laser de haute précision et reconstruit par le logiciel Geomagic Studio 4 dédié aux applications de l'ingénierie inverse.



**Figure II.8 :** Squelette complet du siège d'auto (a) et composant testé (b). [29]

Le modèle CAO de cet objet est le modèle principal utilisé pour tester la qualité de l'acquisition de photogrammétrie.

Ce type d'objet physique représente une étude de cas difficile en raison de ses courbures et de ses caractéristiques. Il est donc difficile d'obtenir une reconstruction complète du modèle

CAO dans l'environnement « Photo modeler », mais il est possible d'utiliser des méthodes de photogrammétrie comme outils de numérisation et de mesure. [29](Voir figure II.9)



**a** Siège avec cibles.

**b** Modèle CAO de siège.

**Figure II.9** : Représentation d'un siège traité [29]

### II.3.3 Scanneur laser

Le télémètre laser, a rendu relativement simple l'acquisition de l'espace coordonnée d'un grand ensemble de points à partir de la surface d'un objet 3D. Applications qui bénéficieraient d'une méthode efficace et fiable pour construire un modèle de cette collection de mesures comprend:

-l'ingénierie inverse : à partir d'un objet existant, reconstruisez un modèle sur ordinateur, puis analysez et modifiez sa conception. L'ingénierie inverse à des applications pertinentes dans l'industrie manufacturière.

-Analyse de forme: analyse la déformation d'une pièce mécanique après une collision.

-Création de mondes virtuels 3D: créez rapidement des modèles de personnages, d'acteurs et vaisseaux spatiaux de leurs vrais homologues ou de maquettes d'argile.

-Fax 3D: scannez un objet et transmettez les données numérisées sur une ligne téléphonique. La station réceptrice reconstruira le modèle et fabriquera une copie à l'aide d'un Technique de prototypage rapide telle que la stéréo lithographie.

-Modélisation sur mesure: fabriquez des vêtements, des casques ou des prothèses de mode personnalisé à partir d'un scan corporel.

En fait, un scanner 3D est un instrument permettant des reconstructions sans contact de géométries même complexes avec une très grande précision. De telles reconstructions sont générées sous la forme de modèles 3D polygonaux, qui peuvent être utilisés comme base pour la refonte ou l'optimisation des composants eux-mêmes ou des cycles de production pour le contrôle dimensionnel et de qualité à l'aide non destructive techniques ou à des fins de simulation structurelle / mécanique.

À partir de la reconstruction polygonale réalisée par un scanner 3D, l'ingénierie inverse permet de reconstruire le modèle CAO du composant examiné tout en offrant également l'opportunité de reproduire l'intention de conception initiale et les spécifications du projet d'origine. Evidemment, les mesures et acquisitions sur les composants peuvent être réalisées avec différents outils, instruments et techniques et pas seulement avec des scanners 3D, même si le scan 3D est actuellement la technique la plus efficace pour détecter la géométrie d'un objet.[30][32]



**Figure II.10** : Un exemple de scanner laser [33]

#### II.3.4 Machines à Mesure Tridimensionnel (MMT)

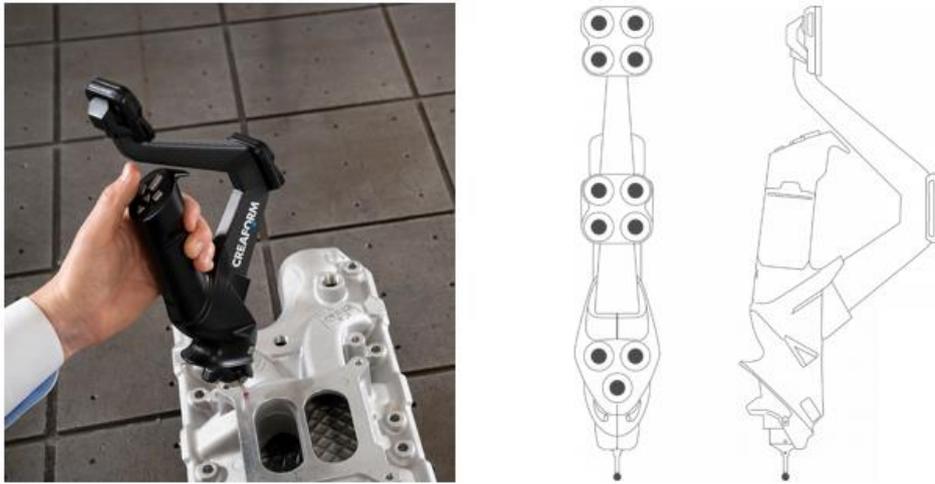
Une machine "scanner laser" peut également être embarquée dans la machine de mesure 3D.

Il existe donc deux types de scanners 3D qui sont couramment utilisés en ingénierie inverse. Un scanner 3D sans contact est un scanner 3D laser ou optique structuré, et le scanner 3D avec contact utilise une sonde de contact pour son fonctionnement. La MMT portable et la MMT optique sont des exemples de scanners 3D.

Les données MMT deviennent automatiquement un nuage de points, qui est ensuite exécuté par un programme spécial. Le programme interprète tous les points du modèle, qui peut analyser les erreurs et les modifier pour corriger le problème.

Le temps et la précision supplémentaires signifient que cette méthode est plus chère que d'autres formes de balayage laser, mais compte tenu de la géométrie de l'objet, le prix supplémentaire peut en valoir la peine. [33][39]

Exemple des MMT quand peut utiliser (voir la figure II.11)



a Représentation d'un modèle de MMT portable.[34]



b Représentation d'un modèle de MMT locale [35]

Figure II.11 :Représentation des genres de MMT (locale/portable).

## II.4 Méthode de reconstruction des surfaces

Dans ce travail, nous étudierons des méthodes automatiques de reconstruction de modèles polynomiaux et polynomiaux implicites à partir d'échantillons. Ces techniques ont été modifiées et améliorées en fonction du problème à résoudre. Surtout :

-Ils ont conçu un algorithme efficace basé sur la forme alpha qui peut relier les points en déduisant la relation spatiale entre les points d'échantillonnage. L'algorithme créera automatiquement une grille triangulaire pour insérer les données ponctuelles. Pour les objets dont la taille des caractéristiques est supérieure à certains  $\gamma$ , l'échantillonnage avec l'intensité

Y est suffisant pour reconstruire un modèle symétrique avec des erreurs finies à partir des seuls points d'échantillonnage.

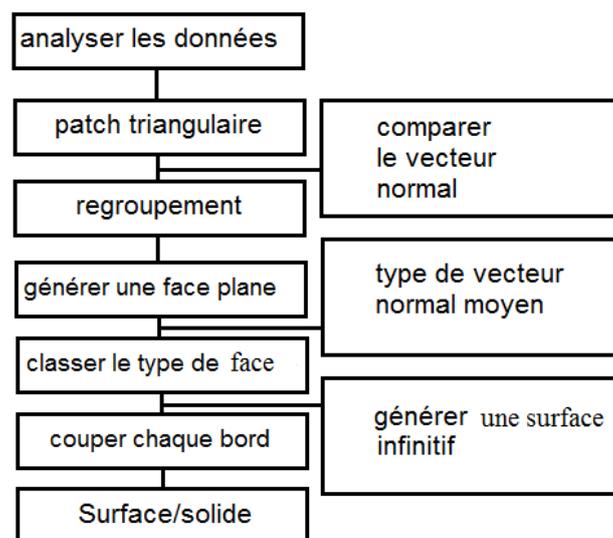
-Ils utilisent une stratégie de réduction de maillage pour simplifier le maillage triangulaire dense tout en conservant des caractéristiques géométriques et topologiques importantes.

Dans ce travail, nous n'avons pas encore exploré certains aspects du problème de l'ingénierie inverse. Par exemple, les données sont sujettes au bruit, en particulier à proximité de caractéristiques évidentes, et il peut être difficile de récupérer ces caractéristiques de manière fiable à des fins de segmentation en utilisant uniquement des informations locales. De plus, lorsqu'une surface complexe et lisse est divisée en petites parties, il sera utile que l'algorithme de reconstruction puisse fournir une segmentation naturelle, telle qu'une segmentation qui prend en compte la symétrie et d'autres caractéristiques de la forme. Des discussions sur ces questions et d'autres peuvent être trouvées dans les commentaires récents.

Beaucoup de travail a été fait pour créer des réseaux triangulaires à partir de données ponctuelles. La figure II.12 montre le processus global de la méthode proposée. Après avoir obtenu la grille triangulaire, les vecteurs réguliers des blocs triangulaires sont comparés entre eux pour déterminer s'ils sont sur le même plan. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que tous les points triangulaires soient trouvés. Développez ensuite le plan de base et la géométrie et coupez-les pour trouver le bord de l'objet.

Enfin, utilisez les bords pour ajuster le plan.

Les étapes détaillées et les symboles de l'algorithme sont les suivants : Étape 1. Générez un patch triangulaire (face). [36]



**Figure II.12** : Diagramme explicatif du Procédure globale pour la reconstruction des surfaces. [36]

Toutes les données ponctuelles du levé sont utilisées pour générer des blocs triangulaires (surface). La figure 13(a) montre l'étape 1 graphiquement. Chaque groupe de triangles est constitué d'un groupe de faces fermées (f). Deux points forment un côté qui a des directions régulières (par exemple, début et fin), et un bloc triangulaire avec trois côtés dans le sens antihoraire (antihoraire) est donnée pour obtenir des unités vectorielles régulières.

Étape 2. Comparaison du bloc triangulaire (face) avec le vecteur normal. Chaque face de triangle (face) a un vecteur normal, comme indiqué ci-dessous : Définissez le vecteur (d) de l'origine au plan perpendiculaire au plan.

Utilisez le vecteur normal du triangle de patch pour comparer le patch de triangle de base avec d'autres patches. La figure II.13 montre la comparaison entre le bloc triangulaire et le vecteur normal.[36]

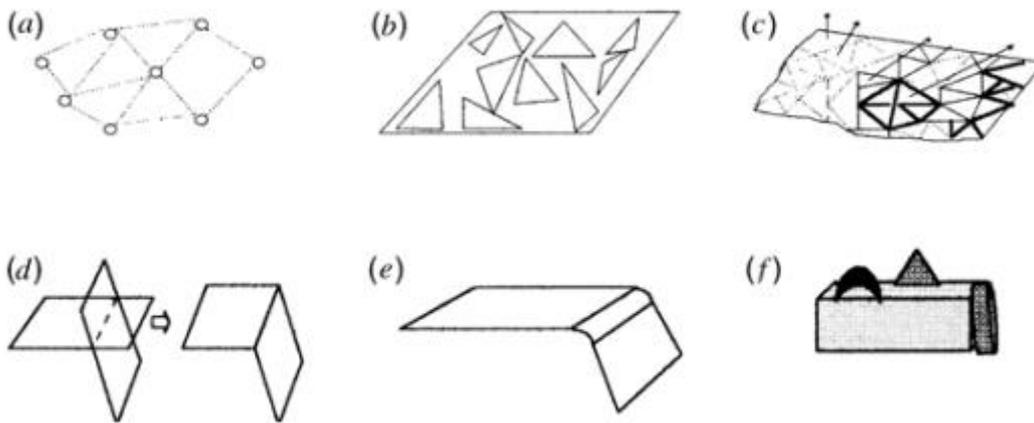


Figure II.13 : Représentation des patches triangulaires .[36]

Procédure de chaque étape : (a) Génération des blocs triangulaires. (b) Comparaison des blocs triangulaires. (c) Catégorisation des blocs triangulaire.(d) Implémentation d'une face plane moyenne. (e) découper chaque bord. (f) Classer les faces analytiques.

L'analyse de la face est classée par une variété d'algorithmes. Un type de classification d'analyse de face est basé sur la moyenne d'un vecteur normal, comme indiqué ci-dessous :1. Plan: similarité de chaque vecteur normal moyen. Figure II.14 (a) montre la forme de la normale moyenne vectrice graphiquement.

2. Cylindre: vecteur orthogonal de chaque vecteur normal moyen. Figure14 (b) montre également l'orthogonale vecteur de chaque vecteur normal moyen.[36]

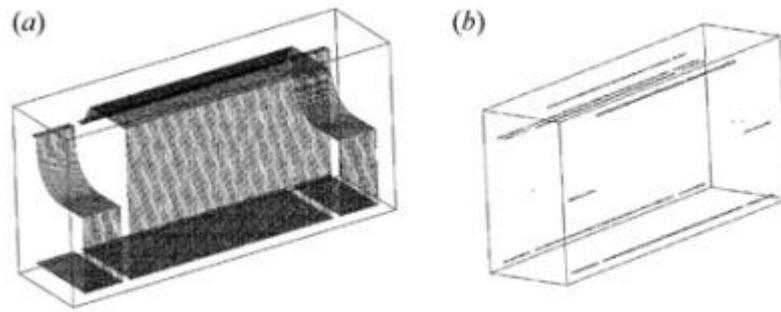


Figure II.14 : Le type de face analytique. [36]

Suivant la méthode CAO de création des surfaces, l'utilisation des données triangulaires sera traitée de différentes manières comme suit :

**a) Reconstruction des fonctions d'extrusion :**

La figure II.15 expliquant le procédé :(a) Point marqué sur le côté latérales de la pièce; (b) les vecteurs normaux du ensemble de points; (c) direction d'extrusion; (d) Point de coupe; (e) modèle 2D reconstruit; et (f) la fonctionne reconstruite.

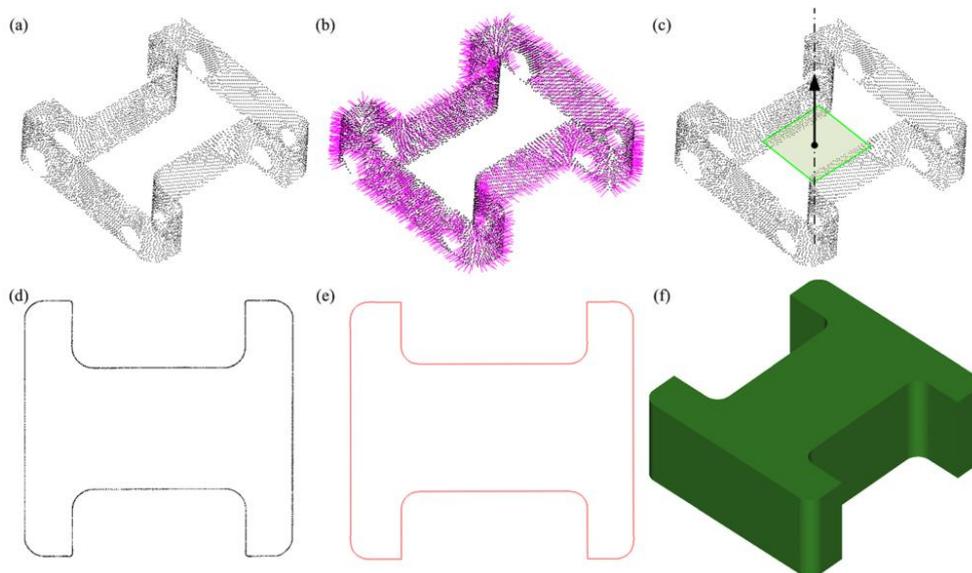
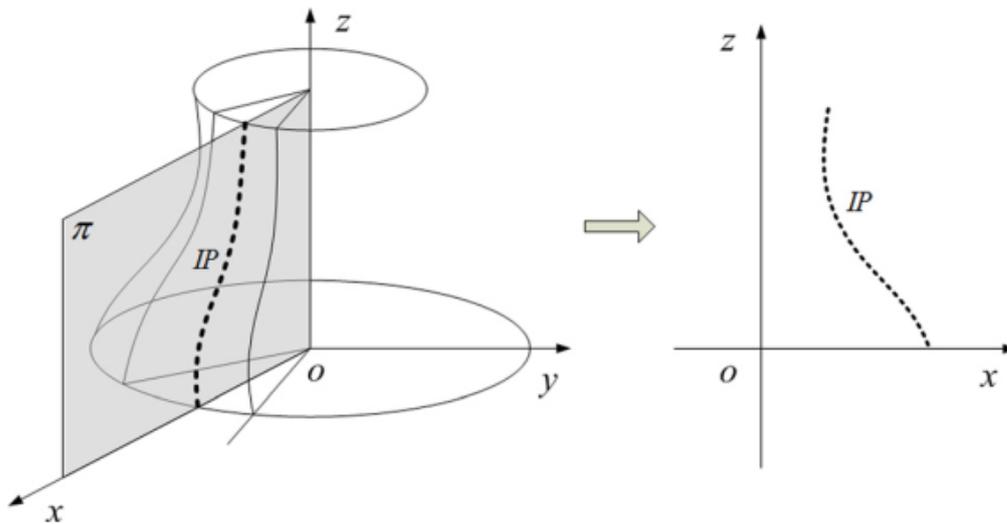


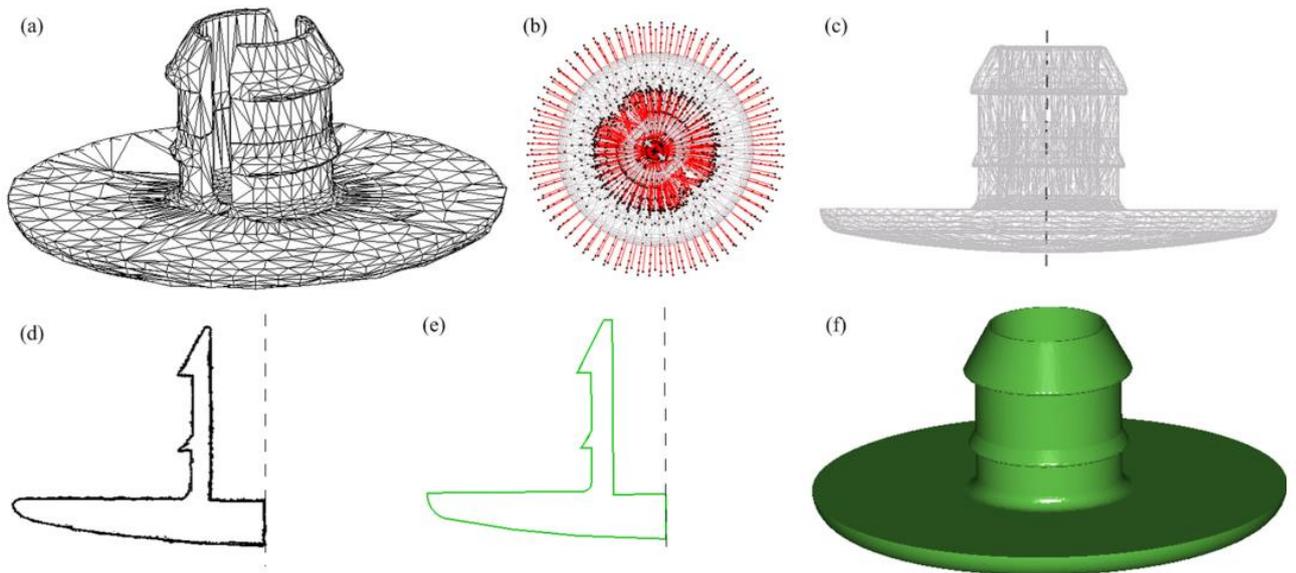
Figure II.15 :Reconstruction d'une fonction d'extrusion.[37]

**b) Reconstruction des fonctionnalités de révolution :**

Dans la modélisation conventionnelle, les entités rotatives sont créées en faisant pivoter un profil bidimensionnel autour d'un axe dans une certaine plage d'angles. L'axe est coplanaire avec la droite du vecteur normal pour tous les points du côté de la fonction de révolution, et nous pouvons extraire l'axe de rotation sur cette base.(Voir figure II.16)



**Figure II.16 :**Extraction du contour de révolution de la révolution fonctionnelle [37]



**Figure II.17 :** Reconstruction de la révolution fonctionnelle. [37]

(a) la triangulation de la pièce; (b) les vecteurs normaux de l'ensemble de points; (c) l'axe de révolution; (d) les points de coupe; (e) le contour 2D reconstruit; et (f) le modèle créé.

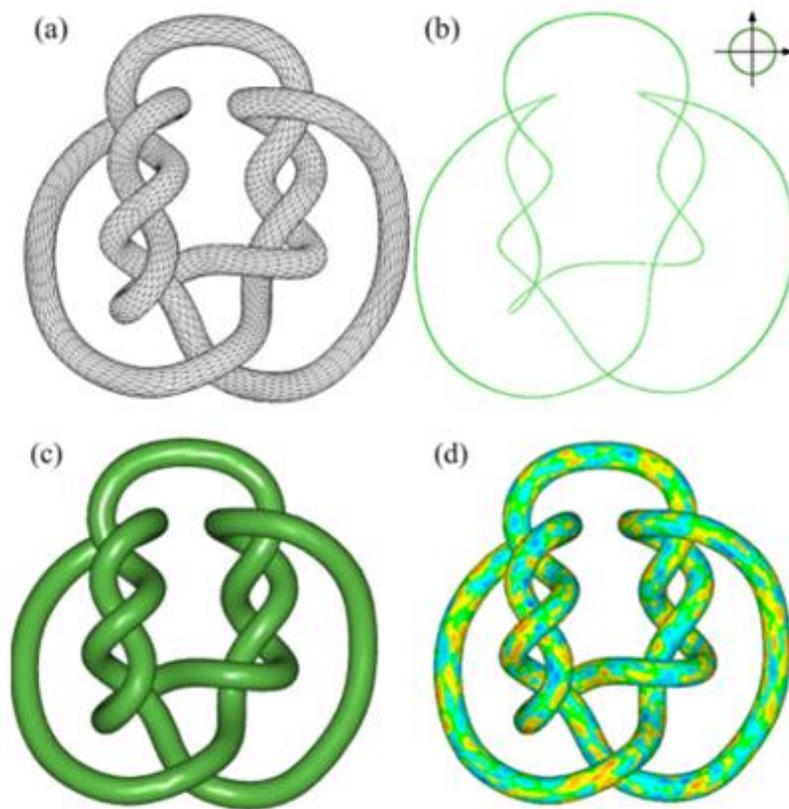
**c) Reconstruction fonction de balayage:**

Dans la modélisation conventionnelle, une fonction de balayage est construite en balayant un contour 2D le long d'une trajectoire spatiale. Fondamentalement, l'opération de balayage a deux types:

- 1 : la section de profil reste perpendiculaire à la trajectoire à tout moment.
- 2 : la section de profil reste parallèle à la section de début à tout moment.

À partir de la construction de balayage fonctionnel, la section de profil à chaque point de la trajectoire doit être orthogonale au vecteur tangent. Sur la base de cette règle, nous extrayons le chemin de la fonction de balayage. [37]

Ensuite, nous extrayons la section de profil. Ici, nous échantillons le chemin ajusté en une série de points de manière adaptative. Cela signifie qu'il y a plus de points d'échantillonnage dans les zones à forte courbure sur le chemin, tandis que moins dans les zones à faible courbure. À chaque point d'échantillonnage, nous créons un plan de coupe avec un vecteur normal égal au vecteur tangent du point d'échantillonnage sur le chemin. Ensuite, la surface de l'entité est coupée par le plan de coupe et les points d'intersection sont obtenus, suivi de la transformation de ces points en un système de coordonnées local. Après avoir rassemblé les points d'intersection de tous les points d'échantillonnage. Nous les adaptons pour obtenir la section de profil en utilisant la méthode de la Reconstruction des contours 2D basée sur des contraintes, qui est la section de profil de balayage fonctionnel.(Voir figure II.18) [37]

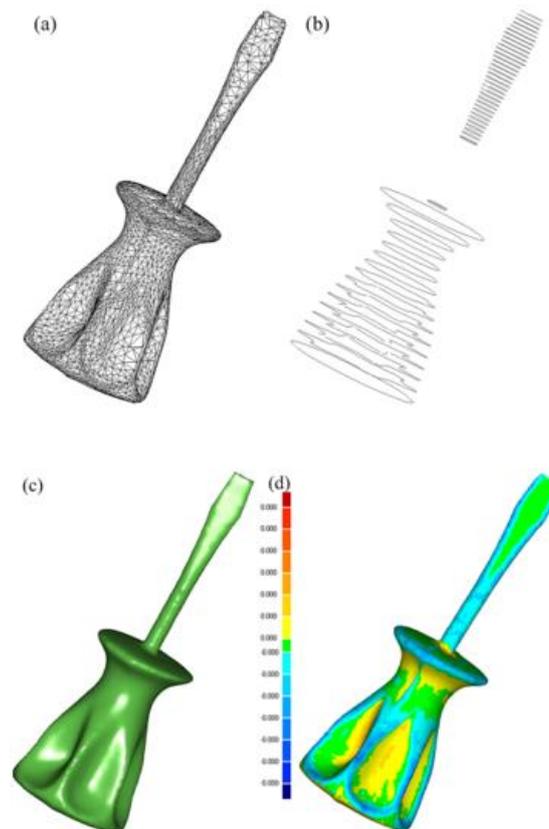


**Figure II.18** : Reconstruction d'un balayage fonctionnel. [37]

(a) maillage triangulaire du solide; (b) la trajectoire et le profil de balayage reconstruits;(c) le modèle reconstruit; (d) une simulation.

**d) Reconstruction d'entités de lissage :**

Dans la modélisation conventionnelle, une fonction de lissage est créée en fusionnant plusieurs sections de profil et en les transformant en formes lisses entre les sections de profil via certaines contraintes. Fondamentalement, cette opération peut être transformée en écorcher une série de sections de profil (contours 2D). La forme, coupée de l'élément de grenier par deux plans de coupe avec une distance suffisamment petite, pourrait être considérée comme généralisée à symétrie de révolution. Sur la base de cette observation, nous pouvons extraire les sections de profil. Plus précisément, nous devons obtenir les plans de coupe optimaux associés à tous les points de la surface de la fonction de lissage. Selon les caractéristiques de la symétrie de rotation généralisée, le plan de coupe optimal de chaque point présente que son vecteur normal minimise la variance des angles avec les vecteurs normaux en un ensemble de points pertinents coupés par le plan de coupe avec la surface de l'entité. En conséquence, le plan de coupe optimal de chaque point peut être trouvé de manière itérative. (Voir Figure II.19) [37]



**Figure II.19 :** Reconstruction d'un modèle de tournevis. [37]

- (a) La triangulation du modèle; (b) les sections du profil; (c) le modèle reconstitué; (d) les résultats d'erreur de la reconstruction.

e) Reconstruction des fonctions de fusion :

Les fonctions de mélange existent souvent dans les pièces de génie mécanique pour des raisons de fabricabilité, esthétique, réduction des contraintes, etc. Du point de vue de la conception, les fonctions de fusion sont générées en faisant rouler une boule sphérique à rayon constant ou variable se déplaçant en contact avec deux surfaces principales adjacentes, (Voir Figure 20,21). Par conséquent, le centre de la bille roulante forme une courbe de colonne vertébrale. Les principaux paramètres sont la courbe de la colonne vertébrale et le rayon de la bille roulante. Plus spécifiquement, nous pouvons convertir le paramètre de rayon en courbe de profil, c'est-à-dire l'intersection de la surface de fusion et le plan normal déterminé par le vecteur tangent du point sur la courbe de la colonne vertébrale. Pour la fonction de fusion à billes roulantes, la courbe de profil est apparemment un arc circulaire. Par conséquent, nous reconstruisons la fonction de fusion en extrayant la courbe de la colonne vertébrale et la courbe du profil.[37]

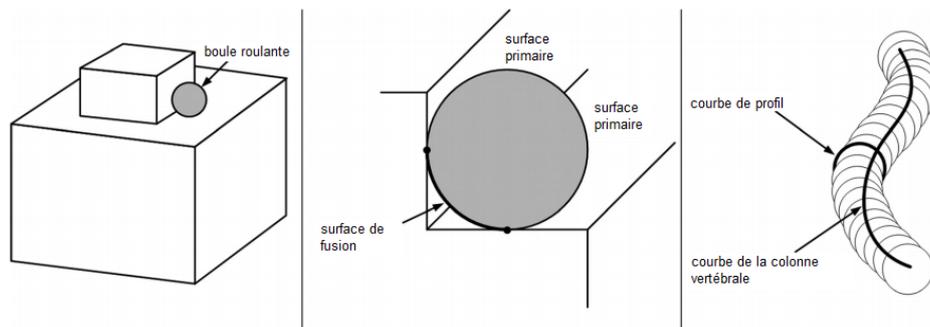


Figure II.20 : L'illustration de la génération de la fonction de fusion.[37]

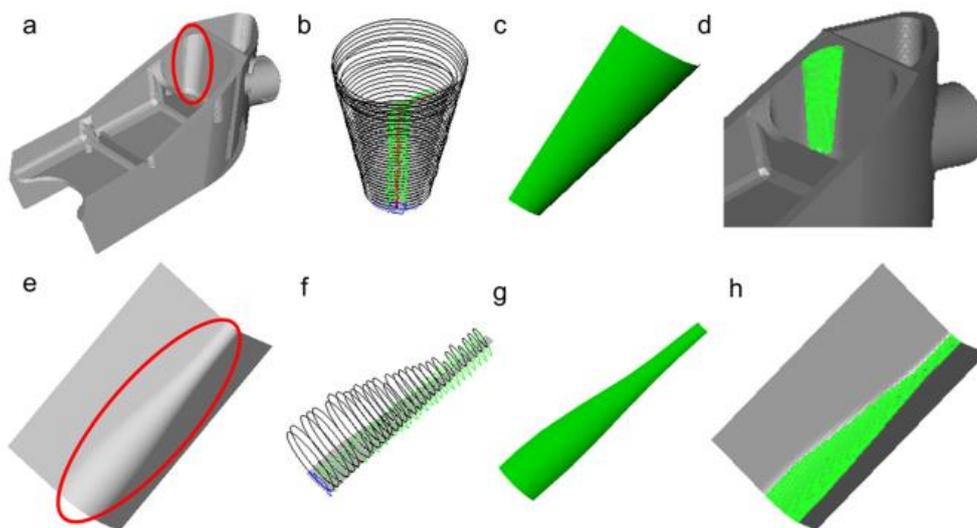


Figure II.21 : Reconstruction des pièces mécaniques avec des fonctions de fusion. [37]

(a) Le maillage triangulaire d'une pièce mécanique contenant la fonction de fusion avec le profil linéaire à rayon variable; (b) la série de courbes de profil (cercles); (c) l'élément reconstruit; (d) l'élément du modèle original; (e) - (h) La reconstruction de la fonction de fusion avec le profil de rayon variable non linéaire. [37]

## **II.5 Génération de modèle CAO - opérations de finition**

La dernière étape de l'ingénierie inverse, à savoir la génération et la finition du modèle « CAO » sont généralement réalisées en utilisant des méthodes très hétérogènes, Cela dépend du cadre global de la reconstruction et du type de résultat souhaité qui peut être obtenu à l'aide d'une stratégie d'ingénierie inverse particulière (paramétrique ou non paramétrique). Les opérations typiques qui peuvent être requises sont la couture de surfaces adjacentes, la création de congés et de chanfrein et l'imposition de contraintes géométriques.

L'étape de génération d'un modèle de CAO est, parfois, directement exécuté lors de la procédure de modélisation / ajustement des surfaces analytiques et elles peuvent être considérées comme une étape unique.[38][39]

## **II.6 Stratégies de reconstruction CAO**

Une classification complète et détaillée des stratégies de reconstruction CAO est en effet difficile. Dans cette section, un arrangement est fourni à partir de différentes perspectives qui sont importantes pour les concepteurs CAO. Une distinction fondamentale est faite entre les méthodes basées sur les caractéristiques et les méthodes non basées sur les caractéristiques. La reconstruction basée sur les caractéristiques vise à créer un ensemble de modèles CAO paramétriques, qui sont les caractéristiques de base que la plupart des méthodes d'analyse ont en commun. Les méthodes non basées sur les caractéristiques, également appelées méthodes basées sur les surfaces, se concentrent principalement sur les méthodes basées sur des outils de forme libre. Le tableau II.1 donne un aperçu de la distribution proposée, un résumé des principaux avantages et inconvénients et une liste de références pertinentes. Il faut souligner que de nombreuses stratégies peuvent généralement être appliquées à différentes parties du même objet, en fonction de leur forme et de leurs propriétés. Par conséquent, dans les applications pratiques, l'utilisation de plusieurs technologies dans un seul processus d'ingénierie inverse est généralement l'option la plus pratique ; Le développement de méthodes de reconstruction qui fournissent différents types d'outils dans un même cadre prouve également ce point. [38][39]

	Strategies de reconstruction CAO	Forces	Inconvenient
des stratégies de reconstruction Basé sur les fonctionnalités	Montage indépendant des surfaces	Génération de surfaces indépendantes étroitement conforme aux données 3D; faible charge de calcul et utilisateur interaction	Récupération partielle ou nulle de la conception intention, comme les contraintes géométriques et les relations entre les caractéristiques; performance effectivité principalement limité par le processus de segmentation
	Ajustement contraint (défini jeu de contraintes par l'utilisateur)	Amélioration du niveau de l'intention de conception récupérée ; exploitation d'expertise humaine en identification des contraintes	Détection et contrôle de validité des contraintes exigées au utilisateur; mathématique complexe formulation pour appliquer les contraintes; coûts de calcul élevés
	Ajustement contraint (détection automatique de jeu de contraintes)	Amélioration du niveau de l'intention de conception récupérée; faible compétences et interaction requises d'utilisateur	Efficacité critique en automatique processus de détection des contraintes et en Définition d'une contrainte valide ensemble; mathématique complexe formulation pour appliquer les contraintes; coûts de calcul élevés, en raison aussi à la détection des contraintes et phase d'identification

	Coupes 2D et croquis	Traitement de coupes 2D significative sou des croquis au lieu de terminer Objets 3D; adapté à la mécanique des pièces générées par des opérations (p. ex., lissage, balayage, extrusion)	Sélection critique de sens sections (demandées aux utilisateurs ou par moyen de procédure automatique); efficacité dépendante de la géométrie
	Basé sur la connaissance	Amélioration du niveau de l'intention de conception récupérée; exploitation des connaissances antérieures (par ex. reconnaissance, jeu de contraintes) sur la pièce / objets à reconstruire; processus de reconstruction orienté vers un modèles paramétriques de CAO	Détection automatique des fonctionnalités et contraintes sur les données acquises actuellement limité à simple et fonctionnalités spécifiques à l'application
	Stratégie de forme libre	Génération de modèles étroitement conformes aux données 3D; efficacité de reconstruction indépendante de la forme; faible interaction de l'utilisateur;	Aucune identification des fonctionnalités de CAO en utilisant des stratégies simples de forme libre

**Tableau II.1** : Comparaison des avantages et des inconvénients de différentes stratégies de reconstruction CAO. [39]

## II.7 Exemple d'un processus de reconstruction des surfaces

### II.7.1 Le scannage de la surface

Premièrement, l'ingénieur qui va faire la reconstruction de surface fixe des points de référence sur le par choc pour que les résultats soient exacts et que le scannage soit complet. Ces points aident le scanner à déterminer son emplacement depuis l'espace et aident également à déterminer les distances pour donner un modèle idéal. (Voir Figure II.22)



Figure II.22 : Scannage de la surface du véhicule. [40]

### II.7.2 Traitement des données scannées

Après avoir scanné la surface du véhicule et après l'obtention du résultat de la figure II.23, l'ingénieur passe à l'utilisation d'un logiciel spécial pour terminer le processus de reconstruction de cette surface.

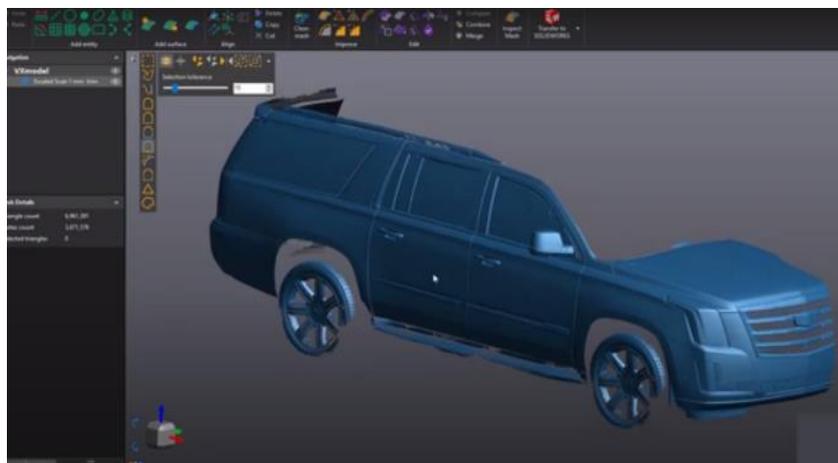
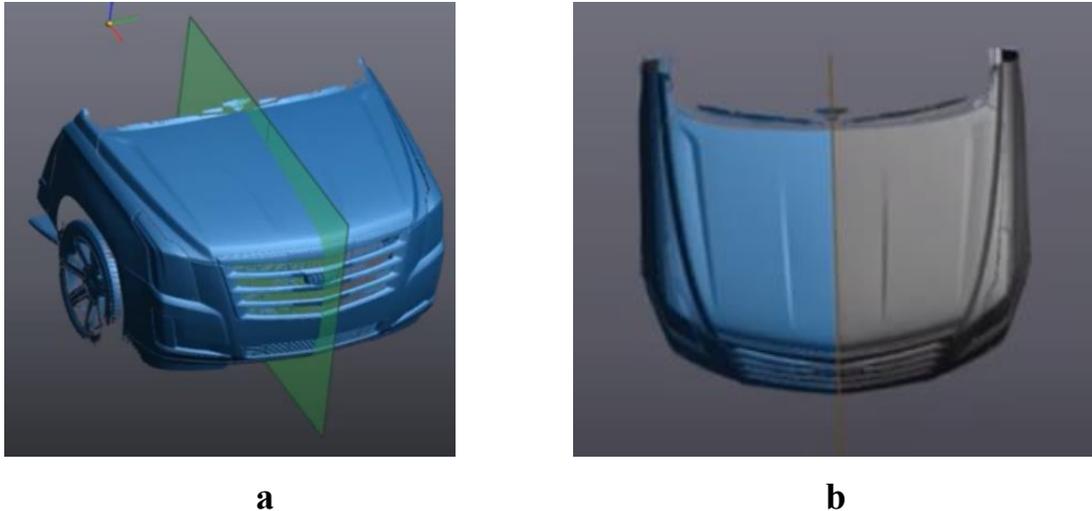


Figure II.23 : Résultat de la surface scannée. [40]

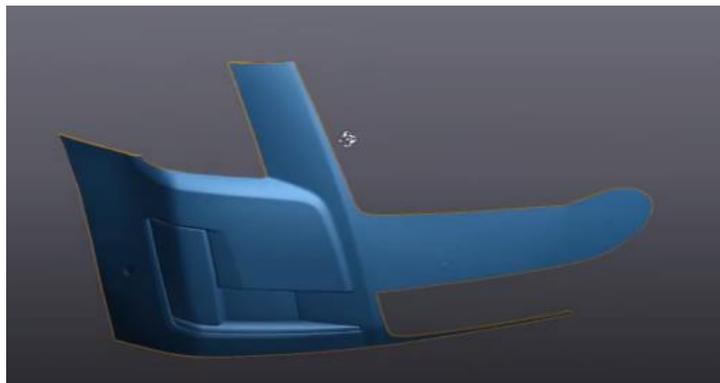
### II.7.3 La reconstruction

Afin de faciliter le processus de la reconstruction, l'ingénieur a d'abord copié les données traitées avec l'utilisation de la méthode de symétrie. (Voir figure II .24)



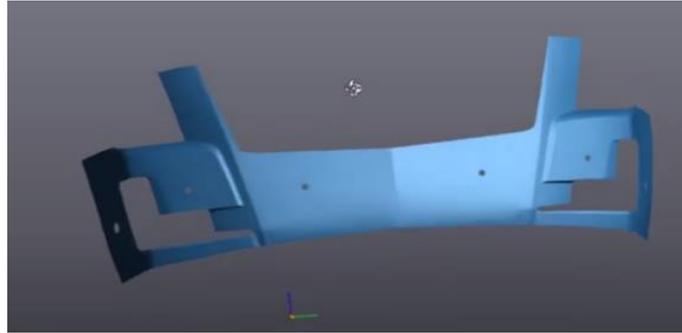
**Figure II.24 :** Génération du modèle avec l'utilisation de la symétrie. [40]

Après l'application de la symétrie l'ingénieur a caché la moitié des données pour travailler sur la 2<sup>ème</sup> moitié et de plus il a fait l'isolement de la partie à reconstruire comme suit. (Voir figure II.25)



**Figure II.25 :** Isolation de la partie à reconstruire (par choc) [40]

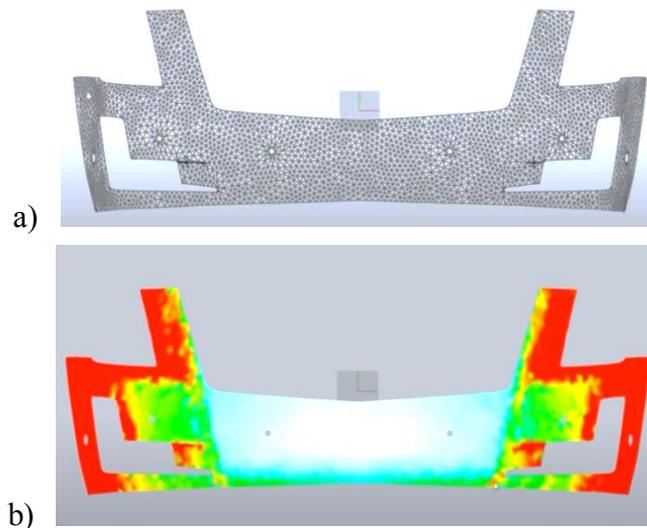
Après avoir terminé le processus de traitement, l'ingénieur revient à la divulgation complète du modèle traité. (Voir figure II.26)



**Figure II.26** : Le modèle du par choc obtenue après le traitement [40]

#### II.7.4 Exploitation de la surface reconstruite

En fin, après avoir reconstruit le modèle 3D du par choc, l'ingénieur effectue un maillage afin de faire une simulation de l'état des contraintes du par choc. Arriver à ce point on peut exploiter le modèle CAO avec tous ses avantages. (Voir figure II.27)



**Figure II.27** : Maillage et simulation du par choc [40]

## II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détails le processus de reconstruction de surfaces ainsi que les techniques utilisées dans les étapes clés de celui-ci. L'acquisition des données de qualité joue un rôle très important et constitue un investissement important pour les entreprises qui veulent faire de l'ingénierie inverse. Nous avons vu aussi que suivant le type de pièce, les techniques de reconstruction de surface peuvent être très différentes. Pour finir, il faut souligner qu'une grande expertise est nécessaire pour effectuer ce travail.

**CHAPITRE III**  
**ÉTUDE DE CAS**

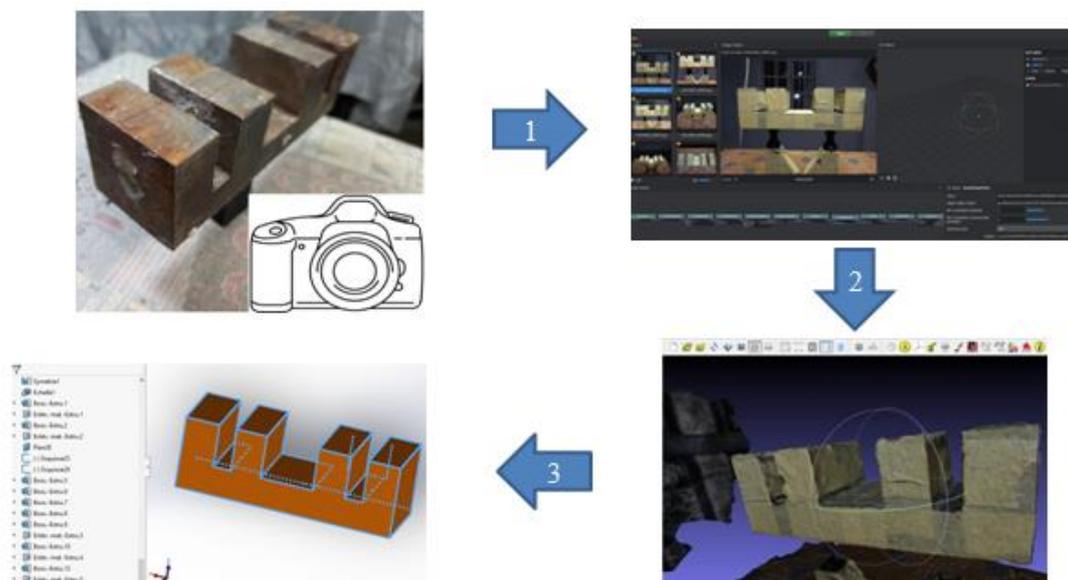
## III.1 Introduction

Dans le premier chapitre nous avons présenté les généralités sur l'ingénierie inverse. Dans le second chapitre nous avons présenté en détails le processus de reconstruction de surfaces. Maintenant, nous allons mettre en œuvre les concepts vus précédemment pour obtenir un modèle CAO d'une pièce physique et pour finir réaliser le programme FAO de son usinage sur une MOCN.

## III.2 Présentation des logiciels spécialisés

Afin de réaliser notre travail, nous avons eu recours à l'utilisation de logiciels spécialisés chacun dans une étape du processus de reconstruction de surfaces. La reconstruction de surfaces étant un domaine en plein développement, il n'existe pas une solution logiciel qui permet de réaliser toutes les étapes avec une qualité satisfaisante, encore moins dans notre cas, à savoir utiliser des logiciels gratuits ou Open Source.

La figure III.1 montre globalement les logiciels utilisés après l'étape de prise de photos de la pièce étudiée, à savoir : Meshroom, Meshlab et pour finir le module ScanTo3D de Solidworks. Nous allons les présenter dans cette section du chapitre avant de commencer la mise en application, afin de faciliter la compréhension de notre travail.



**Figure III.1** : Utilisation de différents logiciels lors des étapes de la reconstruction de surfaces de la pièce étudiée

## III.2.1 Meshroom

### III.2.1.1 Présentation

Meshroom est un logiciel de reconstruction 3D gratuit et basé sur le Framework de Alice vision. Alice vision est un Framework de vision par ordinateur photogrammétrique qui fournit des algorithmes de reconstruction 3D et de suivi de caméra. Alice vision vise à fournir une base logicielle solide avec des algorithmes de vision par ordinateur de pointe qui peuvent être testés, analysés et réutilisés. Le projet est le résultat d'une collaboration entre les universités et l'industrie pour fournir des algorithmes de pointe avec la robustesse et la qualité requises pour une utilisation en production. [41]

### III.2.1.2 L'interface utilisateur graphique de Meshroom

La figure III.2 représente l'interface du logiciel Meshroom avec les points clés de son interface, à savoir :

- 1 **Barre de menu**
- 2 **Démarrer/ pause/arrêter** le traitement avec la barre de progression
- 3 **Volet d'images**
- 4 **Visionneuse d'images**
- 5 **Visionneuse 3D**
- 6 **Editeur de graphique**
- 7 **Propriétés de l'éditeur de graphiques**
- 8 **Chemin du fichier du dossier cache.** [41]

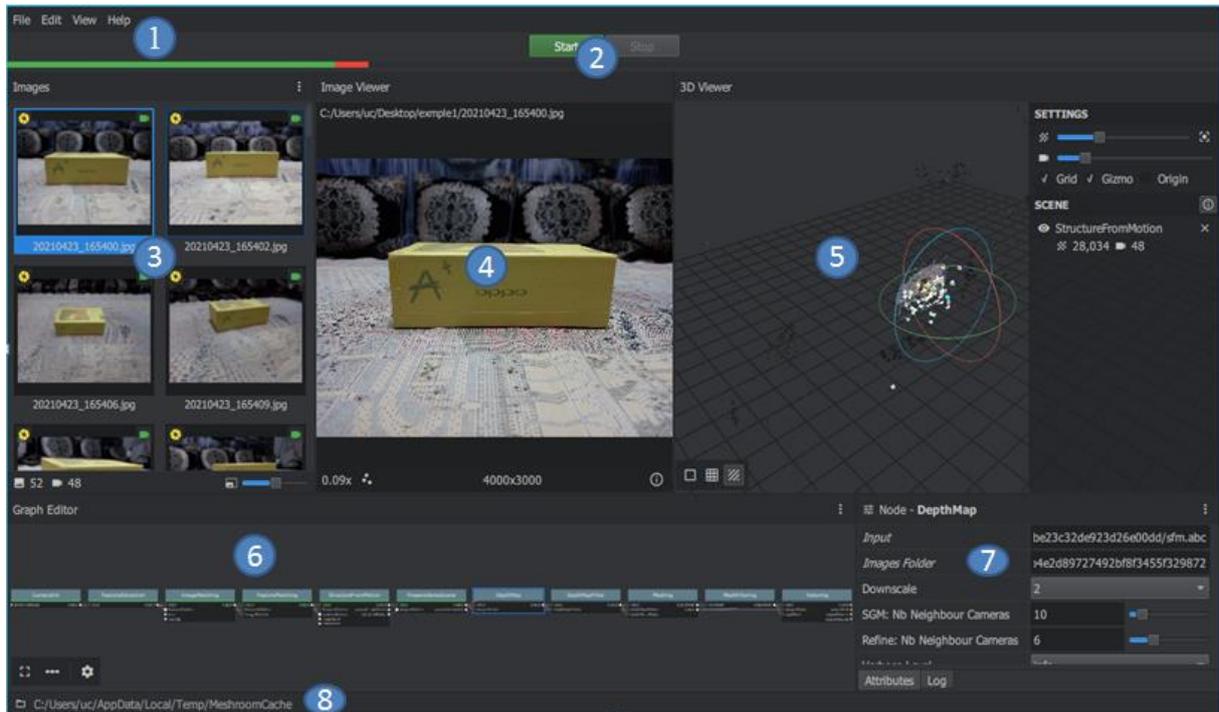


Figure III.2 : Représentation d’interface de Meshroom

### III.2.1.3 Les étapes de traitement dans le logiciel Meshroom

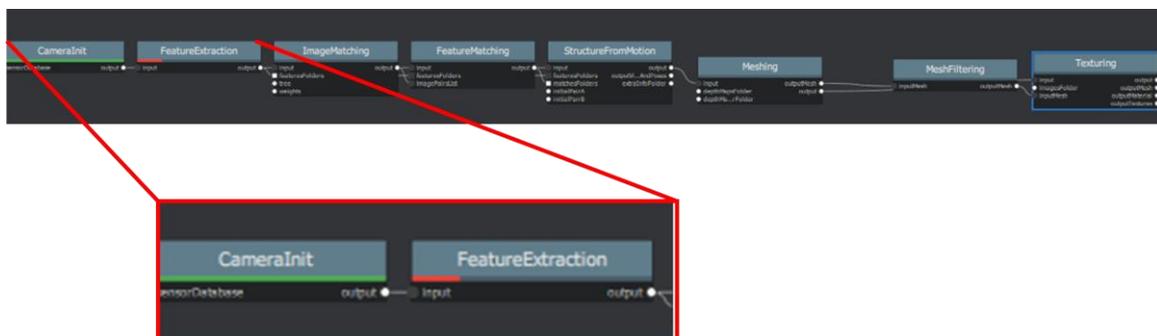


Figure III.3 : Représentation des trois premières boîtes de traitement dans Meshroom

#### a) CameraInit

Après l’importation des photos de la pièce dans le volet d’images. Le logiciel commence par l’étape de détermination des données relatives à la caméra utilisée pour prendre les photos. C’est une étape spécialisée aux informations des capteurs et les capacités de camera, et le traitement des point 3D trouver.

## b) Feature Extraction

Cette étape a le but de traiter les images obtenues par les différents systèmes d'acquisition. Elle peut aussi modifier les formats des fichiers et regroupé les informations communes entre toutes les images pris sans varier les mesures. Et elle a d'autres fonctions à-propos.



**Figure III.4 :** Représentation des boîtes de traitement dans Meshroom

## c) Images Matching

Cette étape a le but de Trier les images deux par deux pour extraire l'angle de vision commun entre les photos et suspendus les images diverges.

## d) Feature Matching

L'objectif de cette étape est d'effectuer des correspondances photométriques entre l'ensemble des Caractéristiques des deux photos d'entrée pour chaque Descripteur de l'image 1, Elle obtienne une liste des caractéristiques codifiées de l'image 2 parce que l'espace des descripteurs n'est pas un espace linéaire et bien précisé. Pour supprimer les conditions incorrectes. Donc pour chaque descripteur de caractéristiques sur l'image 1 elle fait la recherche des 2 descripteurs les plus proches et l'utilise d'un seul relatif entre eux. Et découvrir les deux descripteurs les plus proches dans la deuxième image pour chaque caractéristique. Ensuite, elle utilise les positions des caractéristiques dans les photos pour effectuer un filtrage géométrique.

## e) Structure From Motion

Cette étape a le but de comprendre la relation géométrique derrière toutes les observations données par les photos d'entrée. Et en déduire la structure rigide de la scène avec la pose et le calibrage interne de toutes les caméras. Le pipeline incrémentiel est un processus de reconstruction croissant. Il calcule d'abord une reconstruction initiale à deux vues qui est étendue itérativement en ajoutant de nouvelles vues.

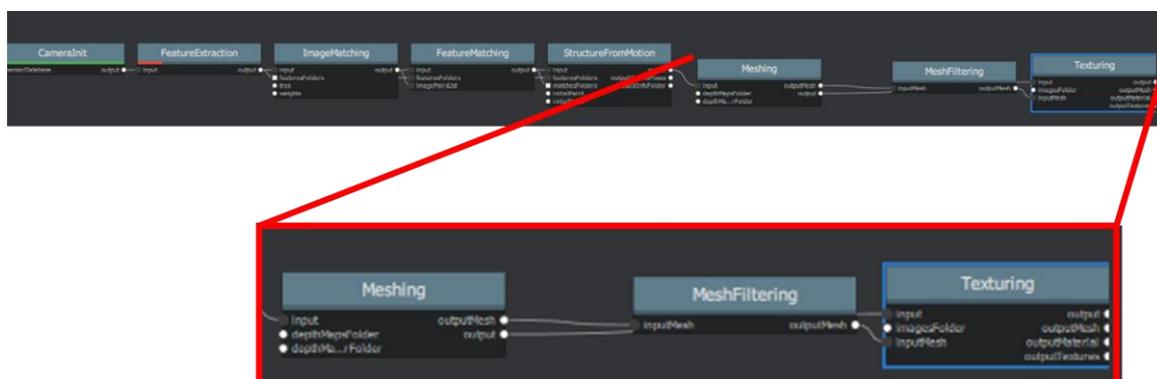
Premièrement, il fusionne toutes les correspondances de caractéristiques entre les paires d'images en pistes. Chaque piste est censée représenter un point dans l'espace.

Cependant, à ce stade du pipeline, il contient encore de nombreuses valeurs anormales. Durant cette fusion de matches, elle enlève les pistes (trajectoires) incohérentes.

Ensuite, l'algorithme incrémental choisisse la meilleure paire d'images initiale. Ce choix est critique pour la qualité de la reconstruction finale.

Après ce calcul viendra le calcul de la matrice fondamentale entre les 2 photos avec la considération que la photo 1 est une repère de coordination du système d'après ce travail la localisation des deux premières caméras est connue, donc on peut faire la triangulation des fonctionnalités de modèle 2D en 3D. Ensuite, l'étape contient la sélection de toutes les photos suffisamment associées aux caractéristiques déjà reconstruites en 3D. Cet algorithme est appelé 'NEXT BEST VIEWS SELECTION' basé sur l'association 2D 3D.

Aussi 'Structure From Motion' est utilisé pour aligner les caméras.



**Figure III.5 :** Représentation des autres boîtes de traitement dans Meshroom

### f) Meshing

La 6<sup>ème</sup> étape est pour créer une représentation surfacique d'une densité géométrique de la scène.

Elle effectue un tétraèdre de Delaunay 3D. Une procédure de vote complexe est effectuée pour calculer les points sur les cellules et les points sur les facettes reliant les cellules.

Filtration des mauvaises cellules en surface. Application d'un filtrage Laplacien sur le maillage pour supprimer les mauvaises cellules. Le maillage peut également être simplifié pour réduire les sommets inutiles.

### g) MeshFiltering

Cette étape a pour but de faire quelques actions comme :

- Le lissage du maillage.
- La suppression des grands triangles.

Les gros maillages sont nécessaires mais tous les autres doivent être supprimés.

Il ya quelques opérations négligeables pour certaines applications, donc on peut modifier ces paramètres.

### h) Texturing

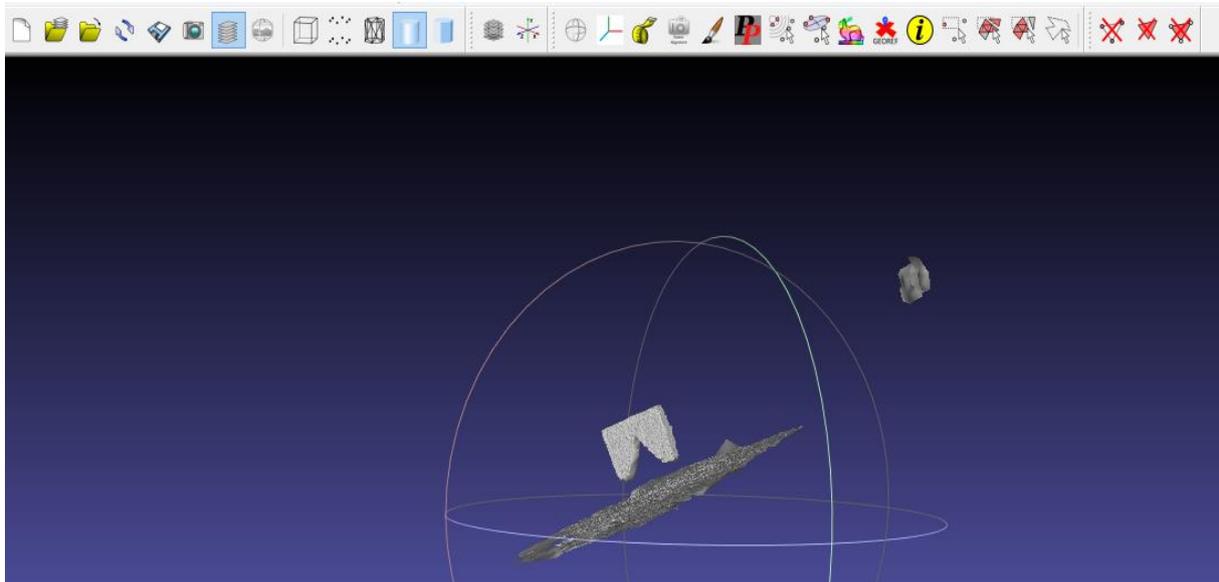
L'objectif de cette étape est de texturer le maillage générer.

Pour chaque triangle, on utilise les informations de visibilité associées à chaque verticale pour récupérer les textures candidates. On filtre les caméras des bons angles par rapport à la surface pour privilégier les caméras (fronto\_parallel) et enfin moyenner les valeurs des pixels.

Des méthodes plus avancées peuvent être ajoutées pour affiner l'alignement avant de faire la moyenne des couleurs des pixels.

### III.2.2 MeshLab

#### III.2.2.1 Architecture générale de MeshLab



**Figure III.6 :** Représentation de l'interface de MeshLab

MeshLab (voir figure III.6) a été conçu comme un outil de système de traitement de maillage 3D général avec les principaux objectifs suivants:

**Facilité d'utilisation** L'outil doit être conçu de manière à ce que les utilisateurs sans de hautes compétences en modélisation 3D puissent l'utiliser (du moins pour les fonctionnalités).[42]

**Orienté scan CH /3D** Le système essayer de rester concentrés sur le traitement du maillage au lieu de l'édition du maillage et de la conception du maillage.

Il présente une application de visualisation de maillage, où un objet 3D, stocké dans une variété de formats peut être chargé et inspecté de manière interactive de manière simple, en faisant simplement glisser et en cliquant sur le maillage lui-même. MeshLab a une variété croissante des Formats 3D (tous les formats les plus courants).

Une fois chargé un maillage, l'utilisateur peut travailler dessus au moyen d'un grand ensemble de filtres paramétriques directs, qui exécute des tâches automatiques telles que le lissage, le remaillage ou simplifiant, ou au moyen d'outils interactifs. Plusieurs maillages peuvent être chargés ensemble et traités séparément ou ensemble suivant une approche plate basée sur des

couches. Les fonctionnalités de traitement de maillage fournies actuellement par 'MeshLab' sont nombreuses et une liste courte, il est présenté ci-dessous:

- Sélection et suppression interactives d'une partie du maillage. Même pour grands modèles.
- Interface de peinture pour la sélection, le lissage et la coloration des maillages.

**Les formats entrée / sortie** pour plus de détail associe au format (voir chapitre I)

- **Importation** PLY, STL, OFF, OBJ, 3DS, COLLADA, PTX, X3D, VRML
- **Exportation** PLY, STL, OFF, OBJ, 3DS, COLLADA, X3D, VRML, DXF
- Prise en charge des nuages de points.

Les fichiers 3D composés uniquement de points sont bien pris en charge au format PLY et OBJ. [42]

- **Prise en charge U3D**; MeshLab est un outil open source à fournir conversion directe des maillages 3D au format U3D. Avec cette forme les utilisateurs peuvent créer, juste avec MeshLab et LaTeX, pdf fichiers avec des objets 3D qui peuvent être trouvés avec la libre courante version d'Acrobat Reader.

### **Filtres de nettoyage des mailles**

- Suppression des sommets dupliqués, non référencés, des faces nulles.
- Retrait de petits composants isolés.
- Unification et retournement normaux cohérents.
- Effacement des faces non multiples.
- Remplissage automatique des trous.

### **Remaillage des filtres**

- Simplification de l'effondrement des bords de haute qualité (même avec de la texture préservation des coords).

- Reconstruction de surface à partir des points (une variante à rotule).
- Surfaces de subdivision (boucle et papillon).
- Caractéristique préservant les filtres de lissage et de carénage. [42]

### **Différents filtres de colorisation / d'inspection**

- Courbure gaussienne et moyenne.
- Bords de bordure, distance géodésique, à partir des frontières.
- Arêtes et sommets non à deux variétés.
- Auto-coupants des faces.
- Occlusion ambiante. Un champ d'occlusion ambiante peut être calculé et stocké par sommet. [42]

### **Peinture de maillage interactive**

- Peinture couleur.
- Peinture de sélection.
- Lissage.

**Outil de mesure** On peut mesurer linéairement entre des points des maillages.

**Outil de tranchage** Outil qui permet d'exporter des sections planes d'un maillage au format SVG.

### **Outils de numérisation 3D**

- Fusion de plusieurs maillages avec le code source de reconstruction de surface de Poisson.
- Rendu basé sur OpenGL Shader. [42]

## III.2.3 ScanTo3D (Solidworks)

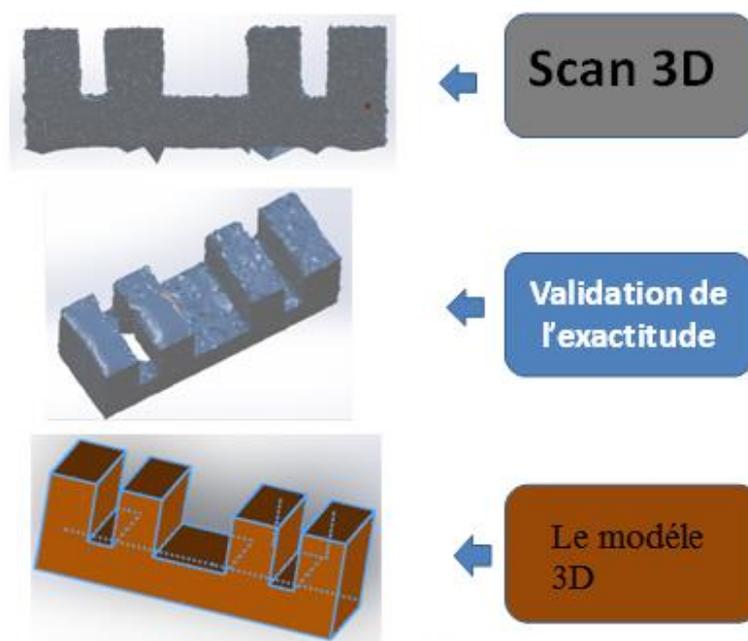
### III.2.3.1 Représentation

ScanTo3D est un outil de capture des modèles de concept physique, des pièces existantes ou des objets, et utiliser ces rendus numérisés pour créer des modèles Solidworks. Il nous permet de convertir des formes extrêmement organiques en modèles solides.

De plus, il peut reconnaître des formes analytiques, telles que des pièces usinées, et peut décomposer et adapter des types de surface analytiques ou non analytiques au maillage.[43]

### III.2.3.2 Les étapes de la numérisation dans SOLIDWORKS

La figure III.7 montre les procédures d'obtention du modèle finale pour l'usinage avec 'scan to 3D'.



**Figure III.7** : Représentation de chaîne de génération du modèle 3D

### III.2.3.3 Les fonctionnalités de ScanTo3D

-Convertir les données de numérisation 3D importées en un modèle de CAO Solidworks 3D.

- Créer une surface ou un maillage.
- Utiliser des assistants pour le maillage, la courbe et la surface.
- Appliquer des données de texture au maillage à partir de fichiers de texture importés.
- Utilisez l'outil d'analyse des écarts pour inspecter et afficher les écarts entre le maillage et les autres entités créées en référençant le maillage.
- Affinez le maillage importé, puis convertissez-le en pièce solide Solidworks 3D.
- Importer des données de nuages de points.
- Exportez les données numérisées dans plusieurs formats: \* .xyz, \* .wrl, \* .stl, \* .3ds, \* .obj.  
(Voir les formats chapitre I)[44]

### III.3 Etude de cas

Comme nous l'avons expliqué dans les chapitres précédents sur la rétro-ingénierie et les moyens par lesquels nous pouvons y parvenir, nous avons choisi la méthode de la photogrammétrie. (Voir chapitre II).

Nous avons essayé le plus que possible d'obtenir des résultats acceptables en utilisant cette méthode, malgré les difficultés que nous avons rencontrées en raison du manque d'aides et du manque d'équipements tels que des ordinateurs, des appareils photo et des salles pour la photographie puisque la photogrammétrie a besoin des salles spéciales qui aident à obtenir de bons résultats qui facilitent le processus d'extraction d'informations.

#### III.3.1 L'acquisition des données

Tout d'abord, nous devons photographier la pièce sous tous les angles possibles pour de bons résultats et L'éclairage doit également être bon de tous les côtés.

Ainsi, après un long effort, nous avons fourni l'éclairage nécessaire pour couvrir tous les coins de la pièce. Nous avons également fait l'expérience environ 9 fois, où le total des images capturées était d'environ 582 images. La pièce a été photographiée déballée puis emballée pour choisir les meilleurs résultats .Plusieurs autres pièces expérimentales ont également été photographiées pour acquérir plus d'expérience et de connaissances .Le processus de prise des photos s'est fait de deux manières (avec l'utilisation du flash de téléphone et sans l'utilisation

du flash). Dans notre travail la méthode de prise des photos sans utilisation de flash est efficace que l'autre méthode.

Il faut aussi recouvrir les surfaces brillantes d'une housse adaptée pour que le léger rebond ne pose pas de problème aussi la pièce ne doit pas être transparente pour des résultats garantis, afin de ne pas rendre difficile la coordination entre les images avec l'assurance de la stabilité pendant la prise des photos ce qui ne doit être inférieur à 50 photos pour faciliter le travail ou « Meshroom ».

Nous avons pris l'échantillon montré dans la figure III.8.



(a)

(b)

**Figure III.8 :** Représentation d'échantillon

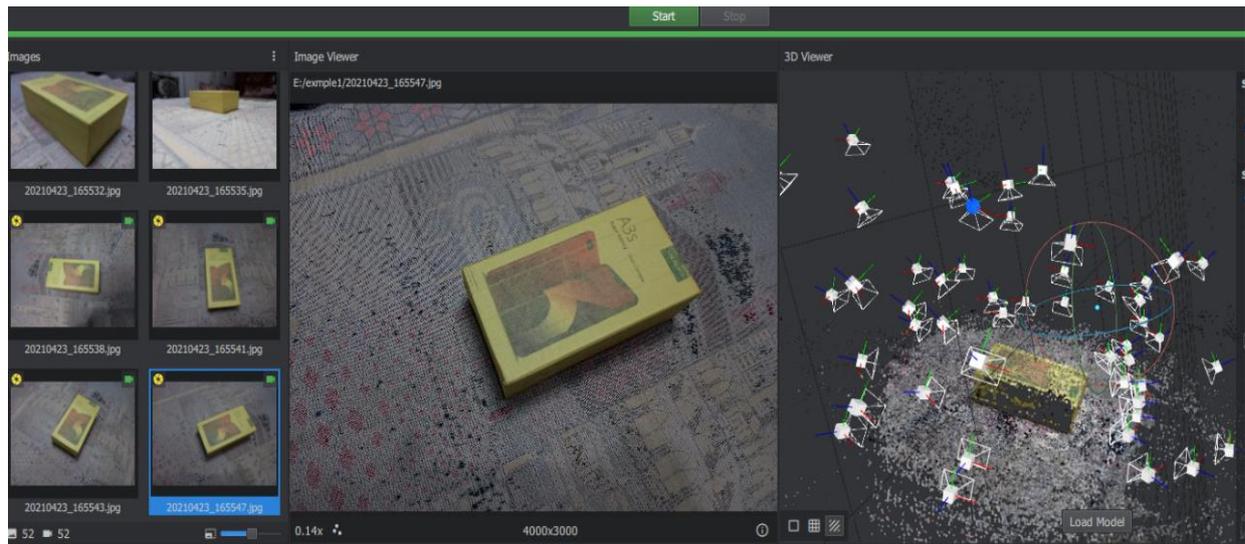
### III.3.2 Le traitement avec Meshroom

Après avoir obtenu les images requises avec les conditions mentionnées ci-dessus, nous passerons à leur traitement avec Meshroom.

Avant d'utiliser Meshroom, nous avons essayé un autre logiciel appelé « Calmap » ce logiciel a le même objectif et les mêmes résultats de manière plus simple, mais par manque d'équipement, comme mentionné précédemment nous avons utilisé Meshroom.

Tous les résultats n'étaient pas satisfaisants, nous avons donc répété le processus plusieurs fois jusqu'à ce que nous atteignions les résultats souhaités.

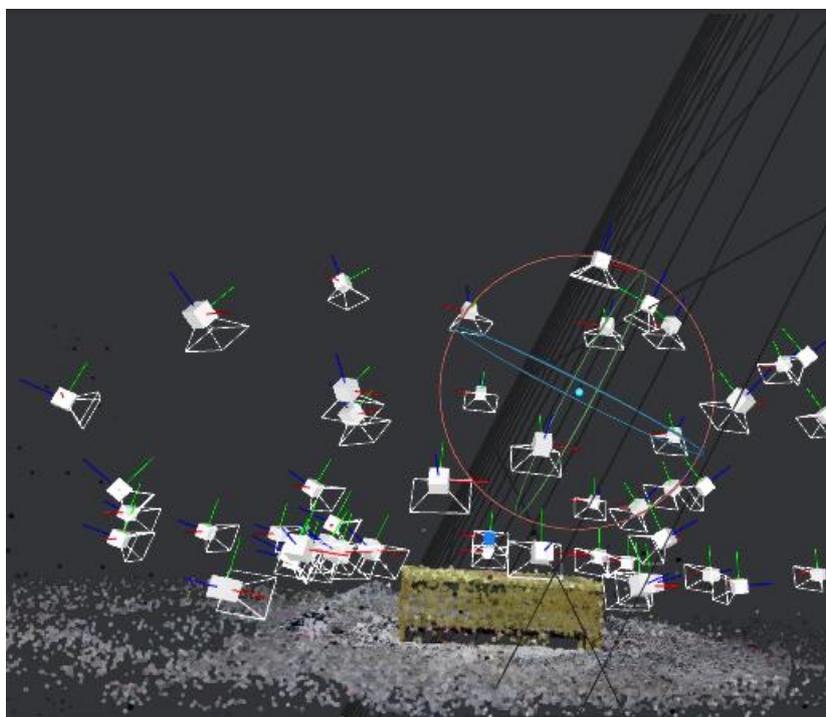
La figure III.9 montre l'interface de Meshroom avec un autre exemple d'essai.



**Figure III.9 :** Représentation d'interface de Meshroom

La figure III.10 représente tous les emplacements de camera dans Meshroom et quelle que données traiter du premier exemple d'essai.

Nous pouvons cliquer sur l'une des caméras montrées dans l'image afin de montrer l'angle sous lequel la photo a été prise.

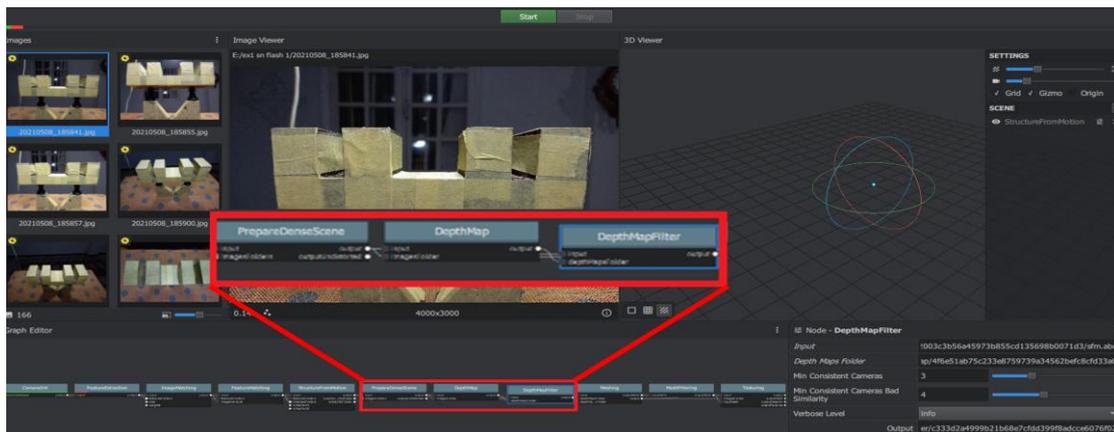


**Figure III.10 :** Représentation des positions de la camera

Parfois certaines boites de traitement causent des problèmes liés aux matériels informatiques utilisés qui nous empêchent d'utiliser le logiciel convenablement, c'est pour cela que l'on doit les enlever pour pouvoir continuer le traitement sans erreurs.

La figure III.11 montre les boites qui doivent être retirées pour continuer à travailler sans obstruction.

Les boites à supprimer (Prépare Dense Scène, DepthMap, DepthMapFilter)



**Figure III.11 :** Les trois boites qui doivent être supprimés

Après avoir supprimé les fenêtres ci-dessus, nous devons ajuster la qualité de normale à élevée dans la fenêtre « Feature Extraction » l'option « Describer Preset ». Comme le montre dans la figure III.12.

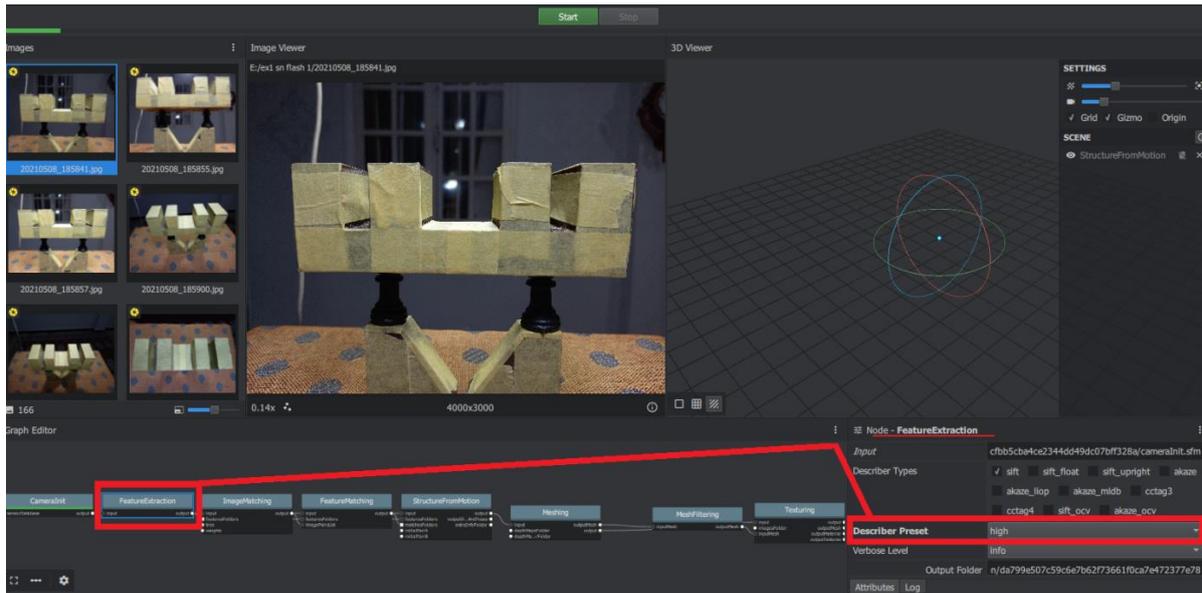


Figure III.12 : Représentation du la fenêtre et leur option a droit

### III.3.3 Le traitement avec MeshLab

Après plusieurs tentatives avec Meshroom dans notre travail de mémoire, la dernière tentative a pris 60 heures pour donner les résultats satisfaisants montrés dans la figure III.13.

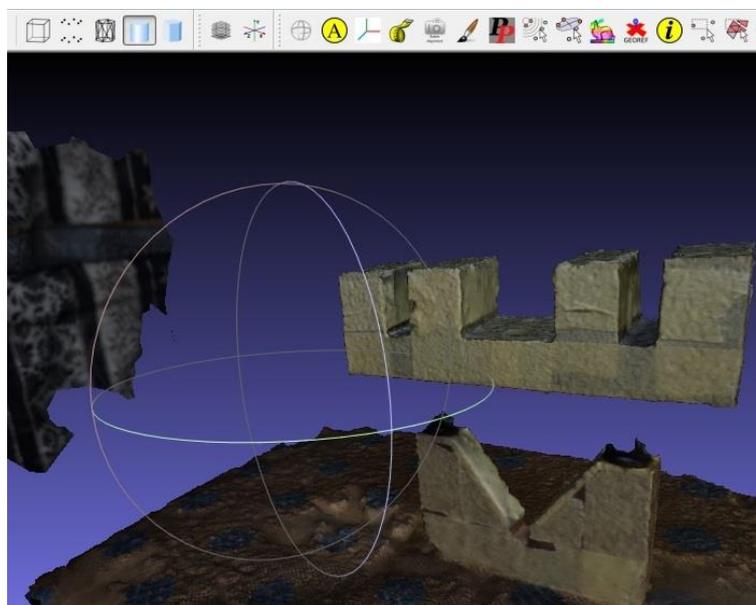
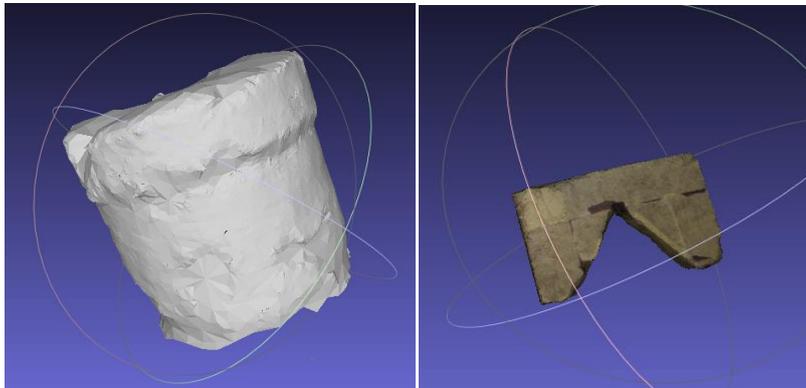


Figure III.13 : Représentation du l'Interface de MeshLab

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la mise en œuvre de la méthode de reconstruction de surfaces a été réalisée sur plusieurs pièces, et ces pièces ont été traitées avec Meshroom et aussi avec MeshLab afin de maîtriser les différents paramétrages. La figure

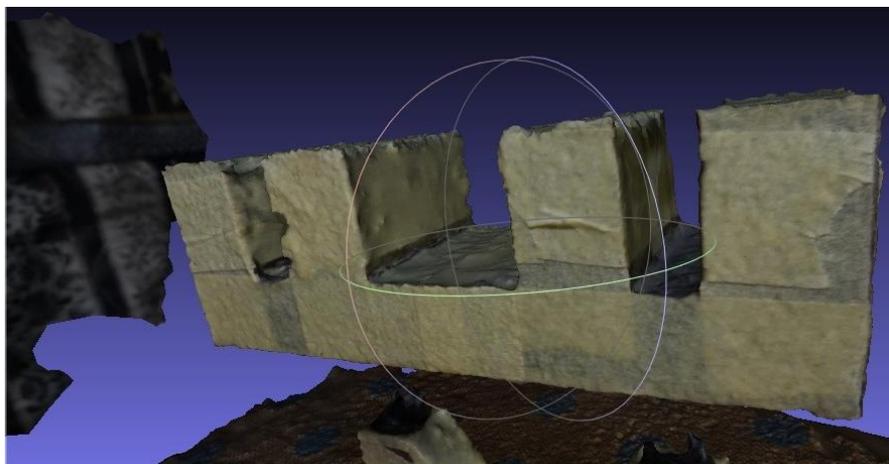
III.14 nous montre les résultats obtenus des modèles traités pour la prise en mains des logiciels.



**a** Une boîte cylindrique      **b** Une pièce métallique couverte

**Figure III.14 :** Représentation des modèles traités

Nous pouvons déplacer et gérer le modèle obtenu dans MeshLab. Pour pouvoir supprimer les informations redondantes avec l'utilisation des outils de ce logiciel comme il est montré dans la figure III.15.



**Figure III.15 :** Modèle du cas d'étude

Après avoir traité les résultats obtenus à partir de Meshroom dans MeshLab et supprimé les informations inutiles avec la conservation à notre pièce uniquement, nous obtenons le modèle 3D montrés sur la figure III.16 sous forme de maillage.

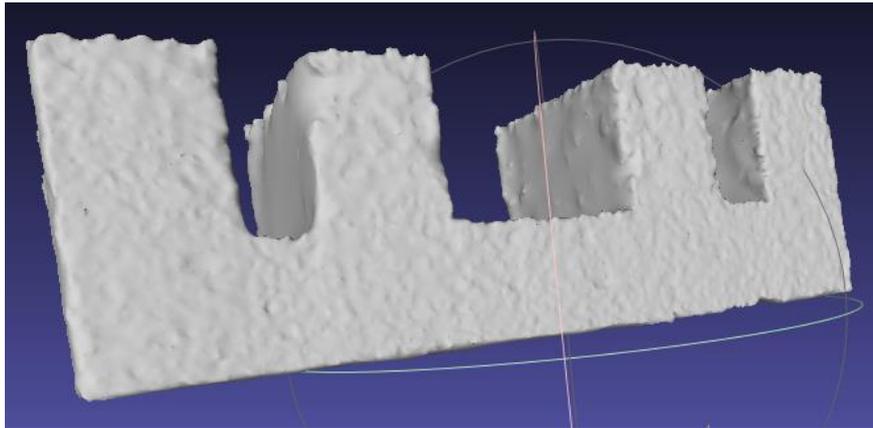


Figure III.16 : Le maillage obtenu texturé

Et puis on passe au logiciel Solidworks pour finaliser le maillage à l'aide de l'option Scanto3D avec la sélection de format (fichier maillage) pendant l'importation de fichier et l'unité doit être en millimètre pour un résultat bien précis, passant étape par étape Utilisant la flèche dans le haut droit. (Voir figure III.17).

### III.3.4 Le traitement avec Solidworks



Figure III.17 : Le maillage dans Solidworks

Premièrement, on doit orienter le maillage par rapport à l'origine d'une façon convenable pour faciliter la manipulation du modèle utilisant de l'assistant préparation du maillage de ScanTo3D, utilisant les paramètres de rotation ci-dessous. (Voir figure III.18)

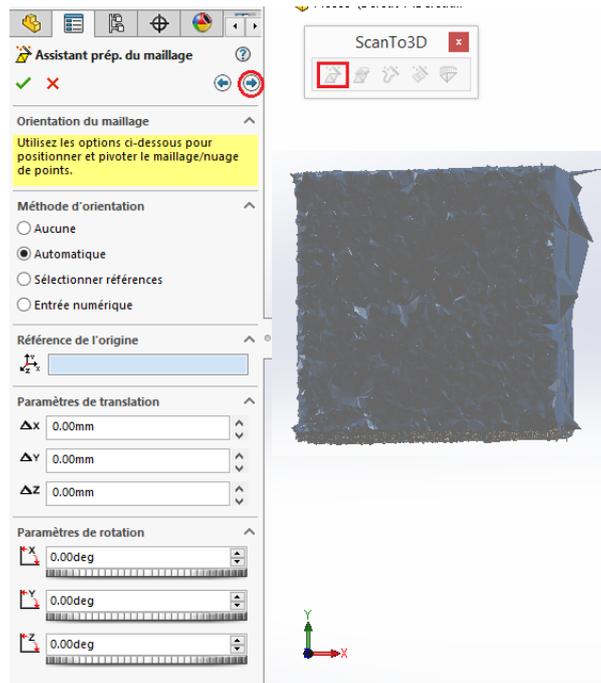


Figure III.18 : Représentation d'orientation de maillage

On utilise (l'assistant préparation du maillage) pour diviser le maillage en deux afin de faciliter le processus de traitement avec l'utilisation des outils de sélections et la suppression (voir figure III.19).

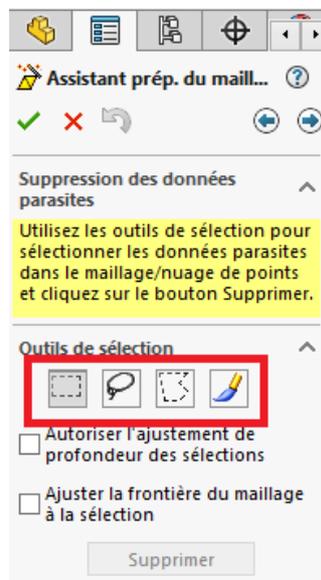
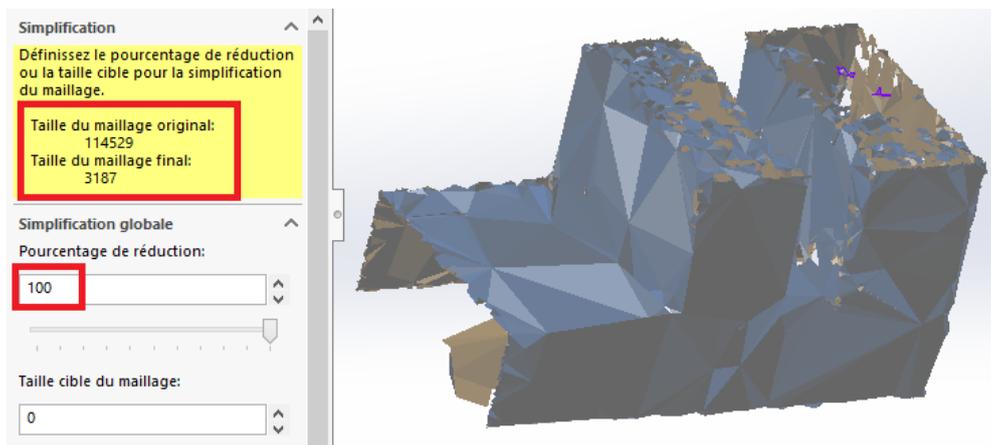


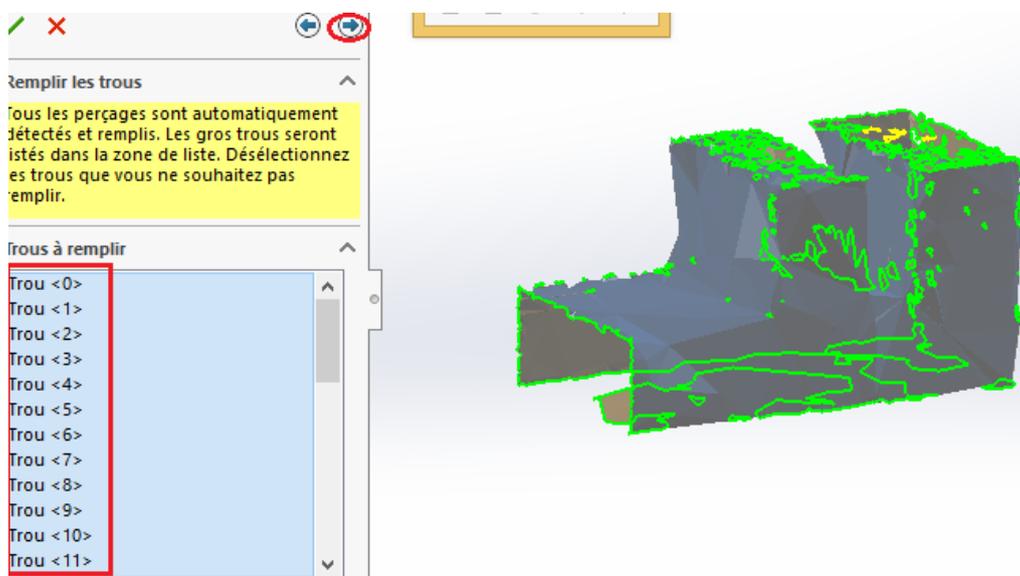
Figure III.19 : Représentation des outils de sélection

Après avoir divisé le modèle en deux moitiés en passe à la simplification du maillage pour la réduction des triangulations avec deux choix (pourcentage ou taille cible). Comme le montre la figure III.20



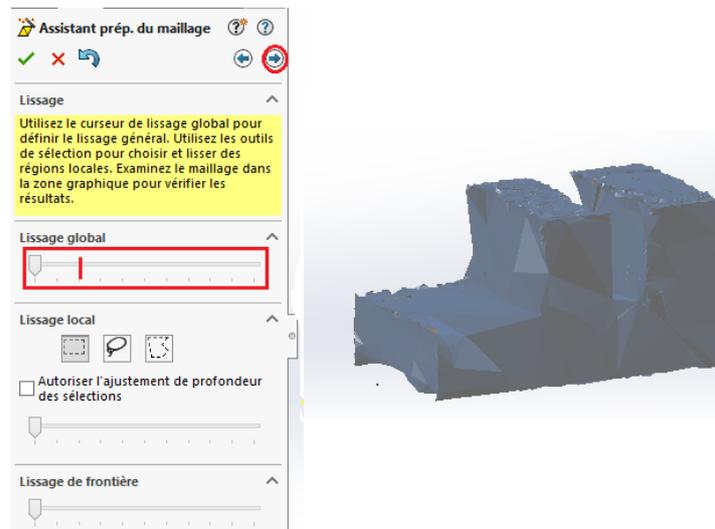
**Figure III.20 :** Maillage avec réduction de triangulation

Ensuite, on va remplir tous les trous qu'on a dans ce maillage, la sélection des trous est automatique (voir figure III.21).



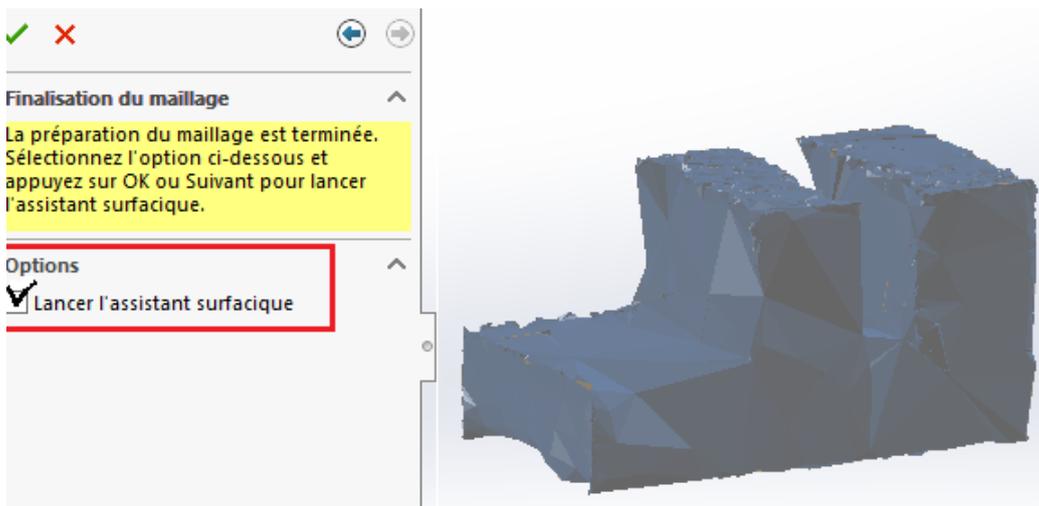
**Figure III.21 :** Les trous sélectionnés dans le maillage

Après le remplissage on passe au lissage des surfaces de maillage. On peut manipuler le lissage avec les commandes montrés dans la figure III.22, soit un lissage local, lissage de frontière ou un lissage global avec un glissement de curseur pour modifier le pourcentage de lissage. Nous devons faire attention à ne pas perdre d'informations dans le processus de lissage, donc nous devons noter le changement du maillage avec soin et attention.



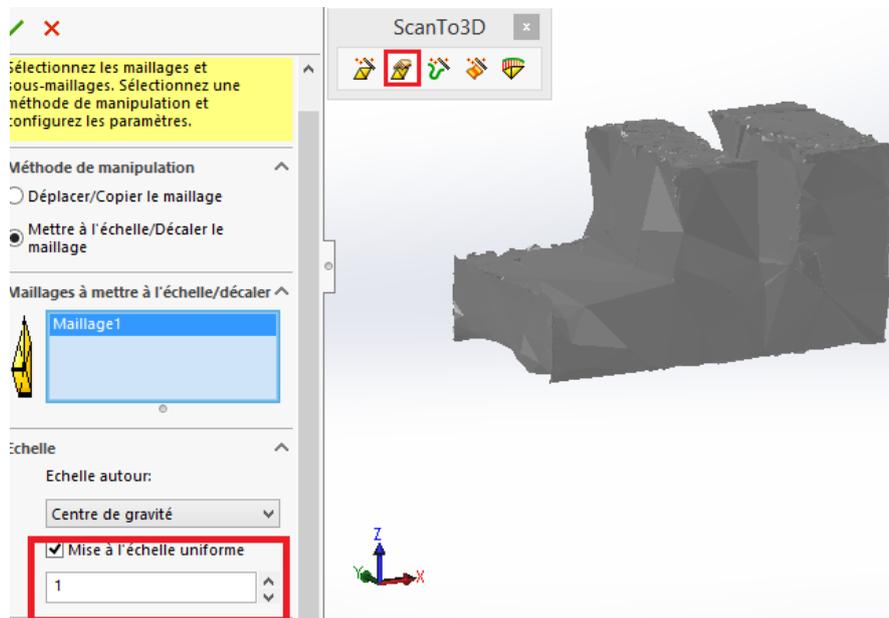
**Figure III.22 :** Représentation du processus de lissage

On passe à la dernière étape de (l'assistant préparation du maillage). Finalisation du maillage, et on doit activer le bouton assistant surfacique. (Voir figure III.23)



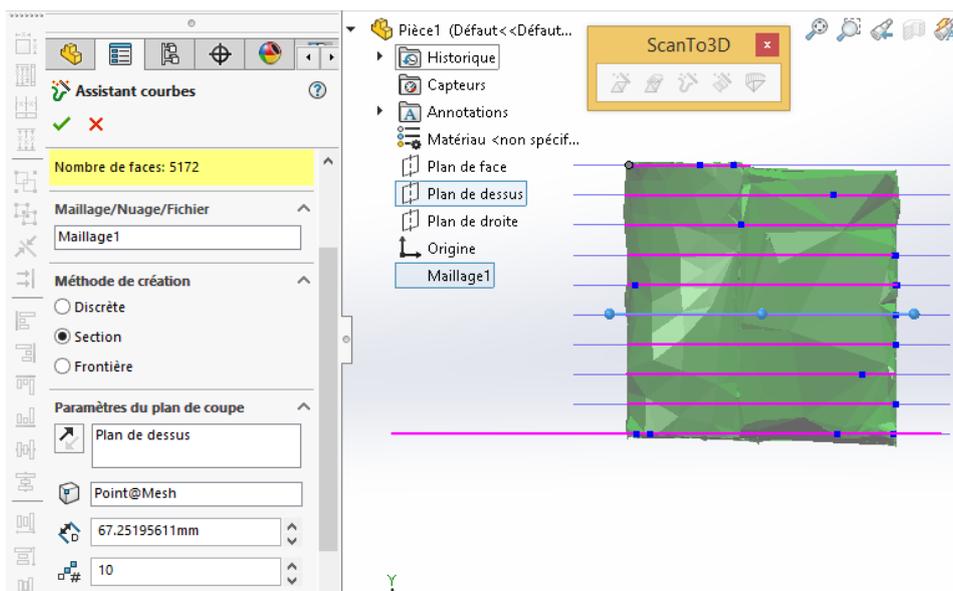
**Figure III.23 :** Représentation de la dernière étape

Ensuite on passe à l'option édition de maillage qui nous donne la capacité de mise à l'échelle le maillage ou de créer une copie de ce maillage.(voir figure III.24)

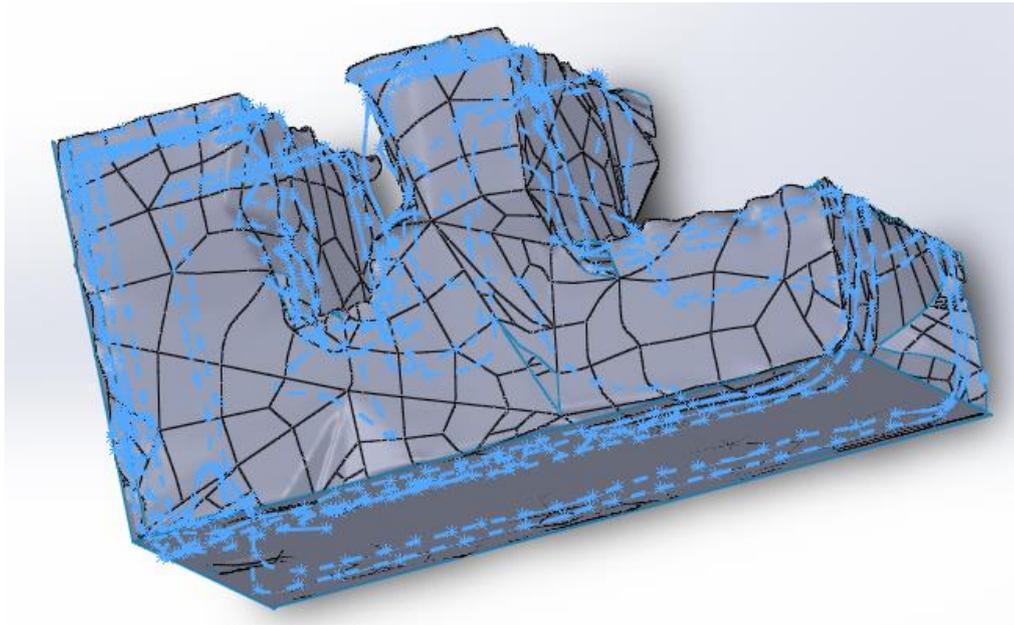


**Figure III.24 :** Représentation du l'étape édition de maillage

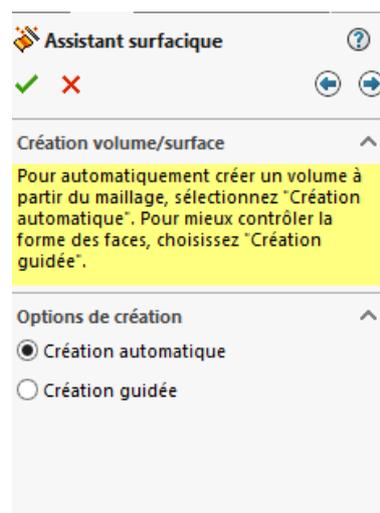
On passe directement à l'option assistant courbe. On sélectionne le maillage et l'option (section) pour (méthode de création) afin de créer des plans verticaux ou horizontaux pour tracer des courbes montrant la forme de notre maillage. (Voir figure III.25)



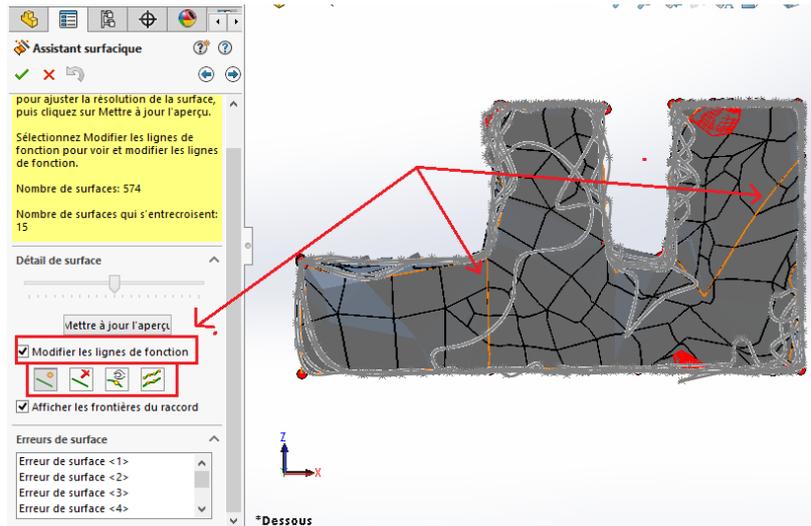
**a**

**b****Figure III.25 :** Représentation des courbes du modèle

Maintenant on explique la dernière étape de notre travail dans ScanTo3D. L'assistant surfacique, premièrement on doit sélectionner l'une des deux méthodes (création automatique, création guidée). (Voir figure III.26)

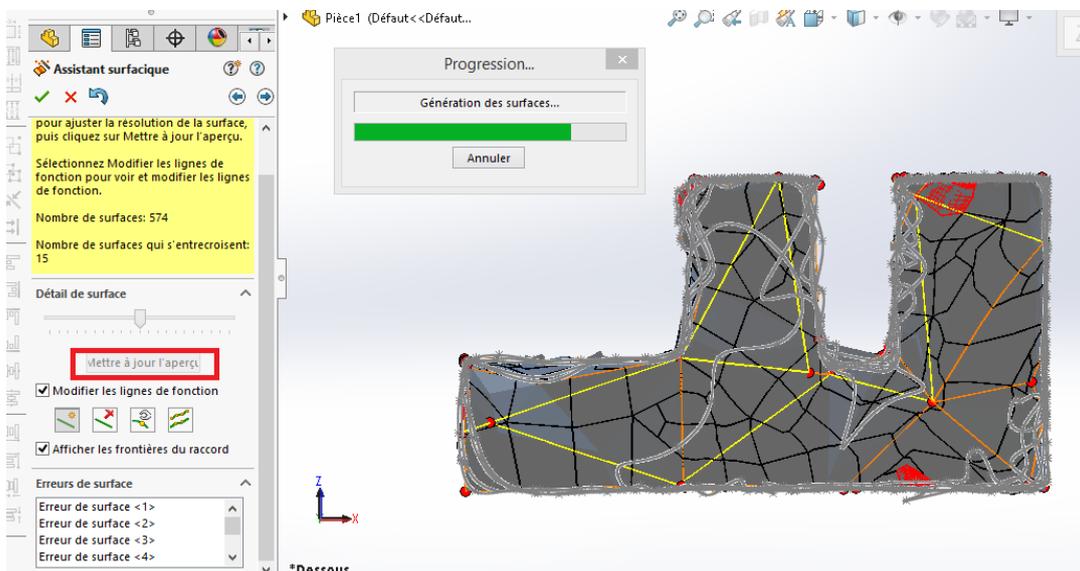
**Figure III.26 :** Représentation des méthodes de création de volume/surface

Après avoir sélectionné une méthode (dans notre cas nous avons choisi la création automatique) on doit activer le bouton (modifier les lignes de fonction). (Voir figure III.27)



**Figure III.27 :** Représentation de la création automatique

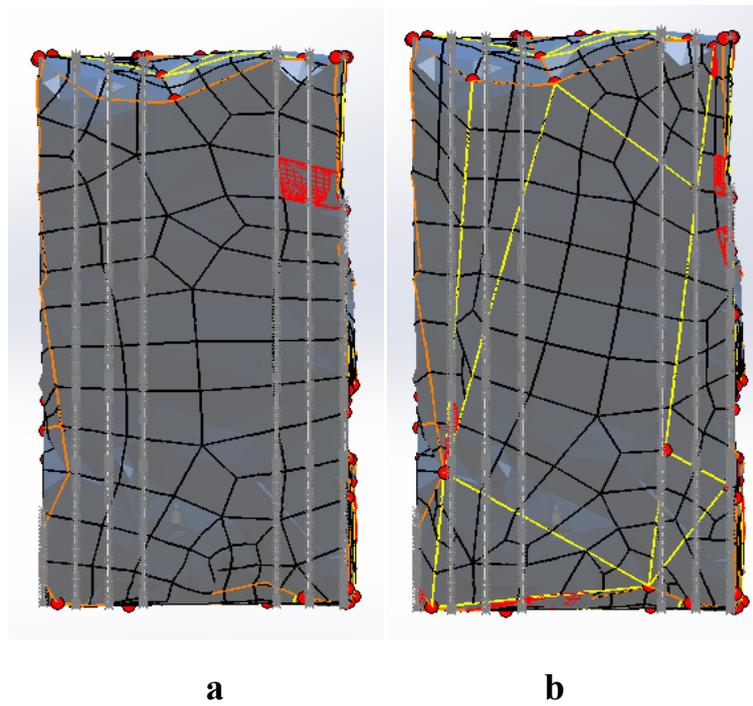
La modification des lignes de fonction ce fait manuellement soit une suppression des lignes ou en ajoutant des autres lignes à l'aide des esquisses fournie par l'option assistant surfacique c'est t'une opération difficile mais important. Apes la modification nous appuyons sur le bouton mettre à jour l'aperçu. (Voir figure III.28)



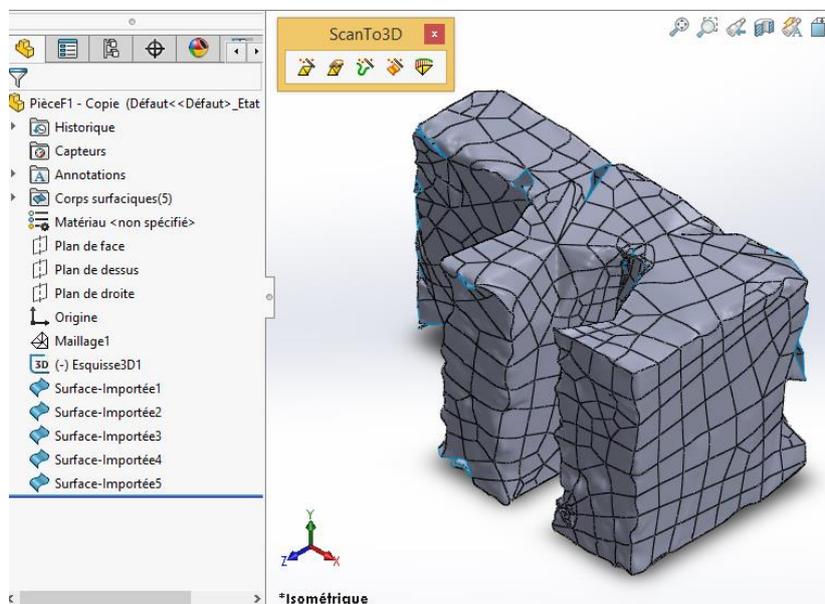
**Figure III.28 :** Représentation de l'ajute des lignes de fonction

Il ya des surfaces inaccessibles pour la création automatique donc on facilite et modifier la triangulation du maillage avec la modification des lignes de fonction afin de se

débarrasser de ce problème. On peut voir l'utilité de modification des lignes de fonction dans la figure III.29

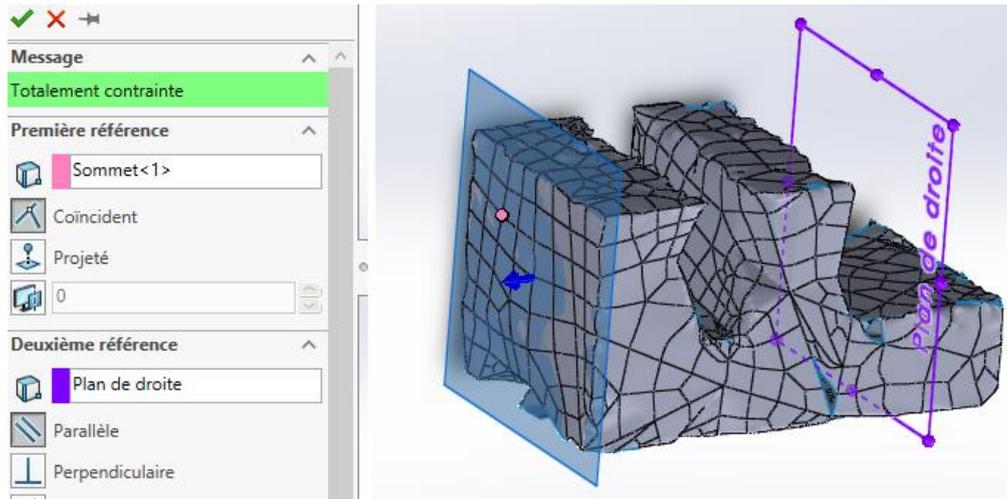


**Figure III.29 :** La comparaison de triangulation après la modification des lignes de fonction

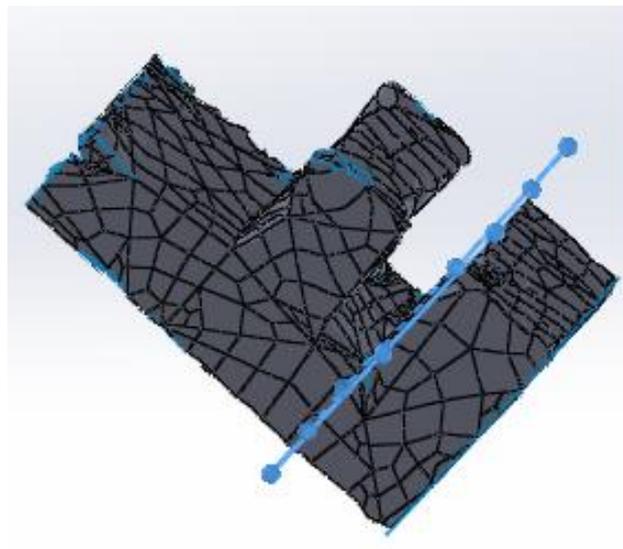


**Figure III.30 :** Représentation du modèle 3D

Premièrement on va utiliser géométrie de référence pour créer des plans coïncidés avec les surfaces de notre modèle comme il est montré dans les figures III.31.



a



b

**Figure III.31 :** les Plan coïncidé aux surfaces du modèle

Ensuite, on va dessiner des surfaces sur les plans identiques aux surfaces de modèle pour la création d'un notre modèle conforme notre modèle avec une bonne finition. (Voir figure III.32)

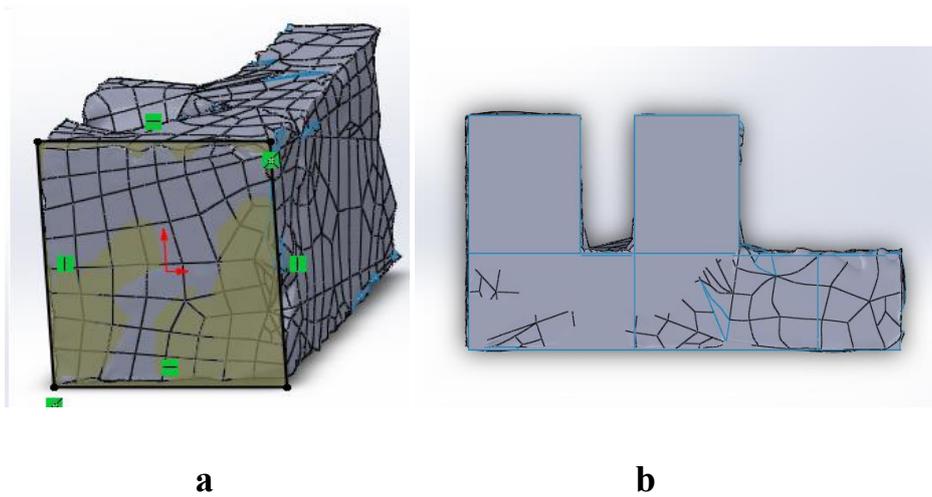


Figure III.32 : Représentation de création des surfaces

La figure III.33 montre les surfaces créées sur l'ancien modèle avec des espaces entre les surfaces créées, notre maillage est inclus dans ces surfaces.

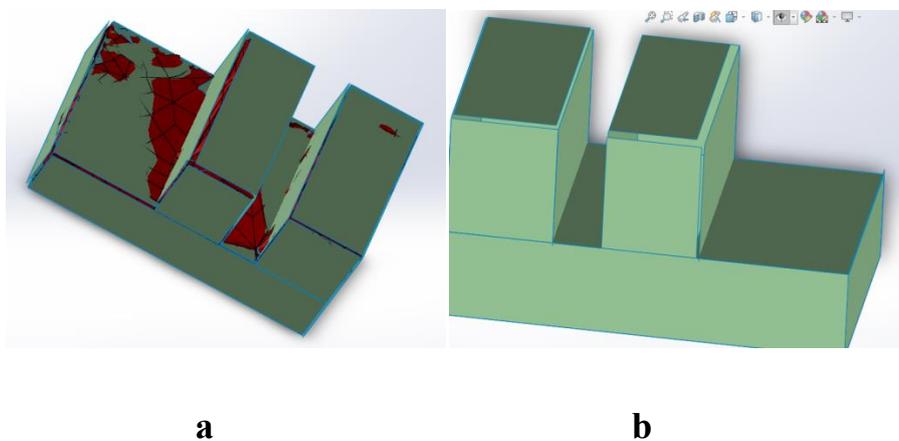


Figure III.33 : Représentation de toutes les surfaces formant le nouveau modèle

On va essayer de compléter le modèle avec le prolongement des surfaces créées. (Voir figure III.34)

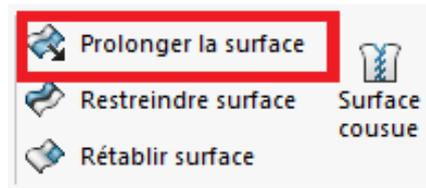


Figure III.34 : Représentation d’option du prolongement

Après le prolongement des surfaces on va obtenu des surfaces non requises. Donc on va les enlever avec l’utilisation de la fonction (restreindre surface) (voir figure III.35)

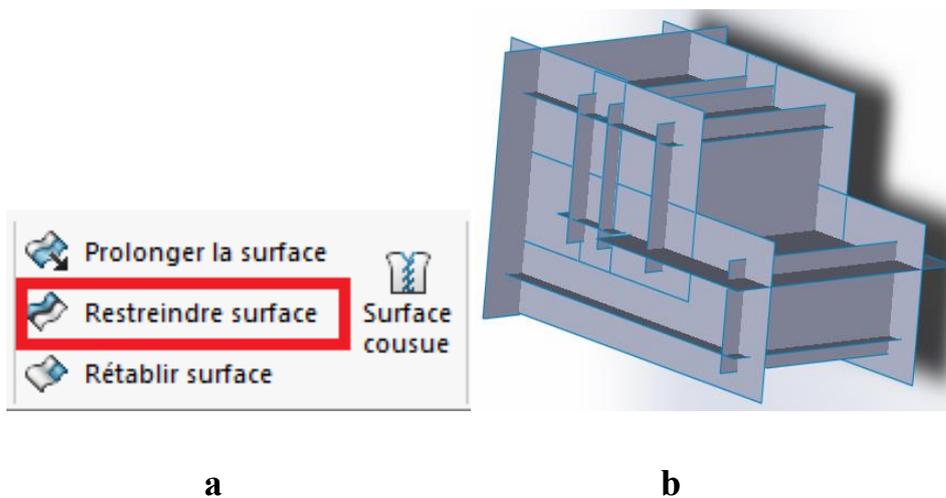


Figure III.35 : Représentation du modèle après le prolongement et l’option de restreindre

La figure III.36 montre le modèle après restreindre les surfaces inutiles avec la conservation du maillage dans le nouveau modèle obtenu.

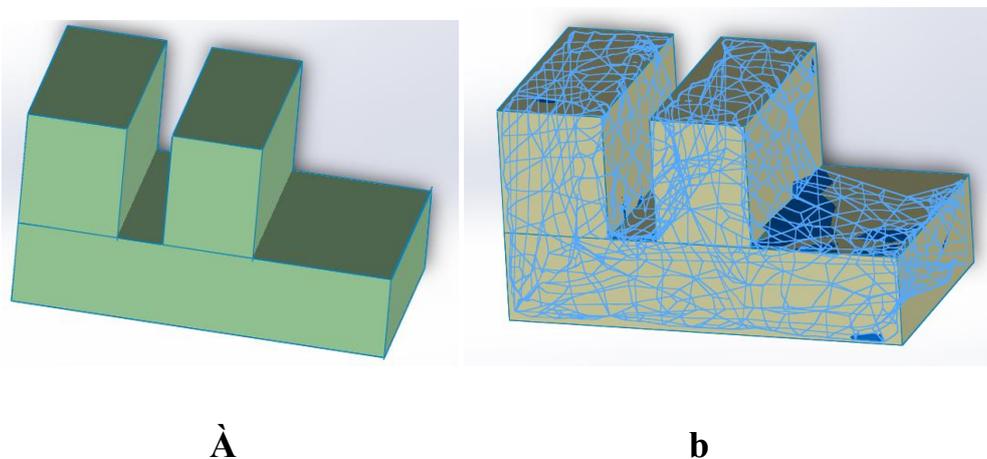


Figure III.36 : Représentation de l’ancien modèle dans le nouveau modèle obtenue

On va lier toutes les surfaces du modèle ensemble pour avoir un solide avec l'utilisation de la fonction (surface cousue) et on doit activer les boutons (créer un solide), (fusionner les entités). La sélection des surfaces doit être surface par surface (voir figure III.37)

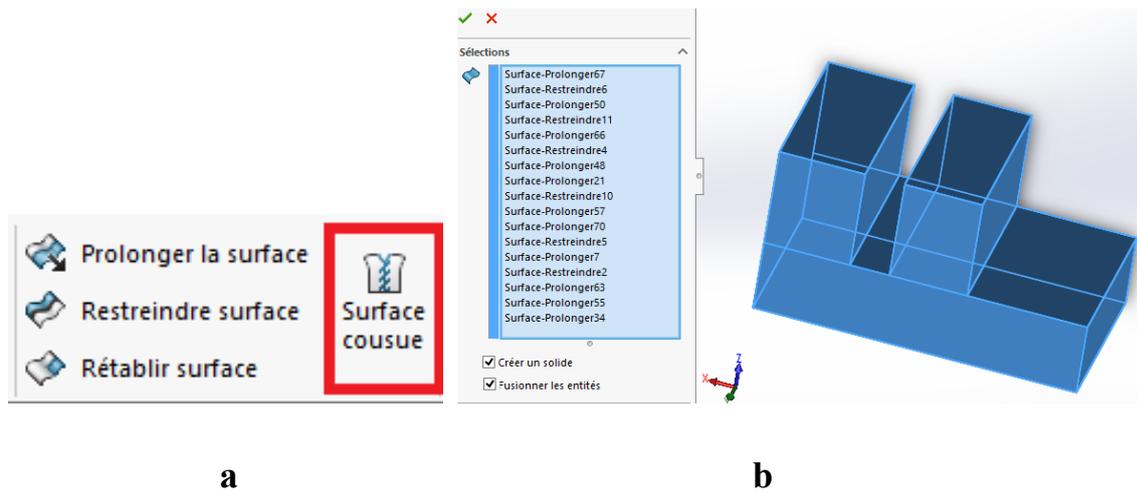


Figure III.37 : Représentation de l'option surface cousue avec la sélection des surfaces

Après la création du nouveau modèle volumique on va utiliser l'option (répétition linéaire – symétrie) pour revenir à notre pièce. (Voir figure III.38)

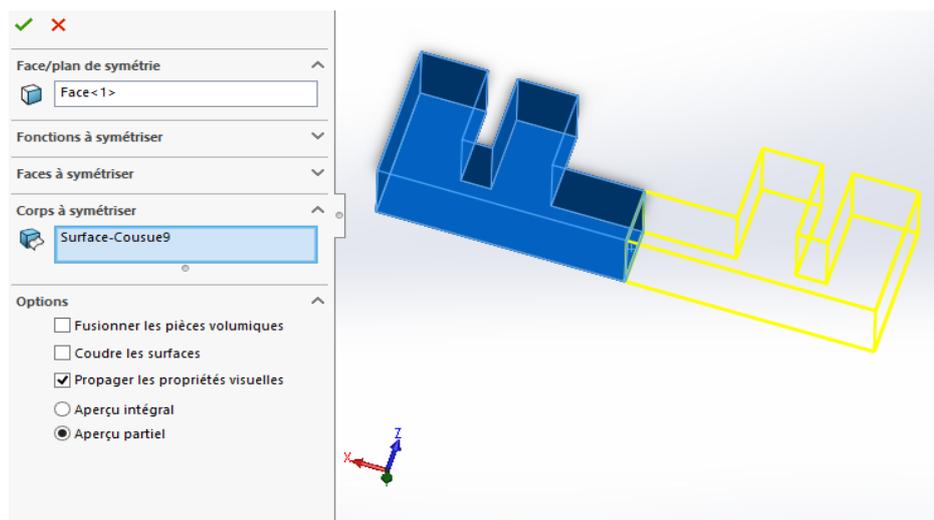
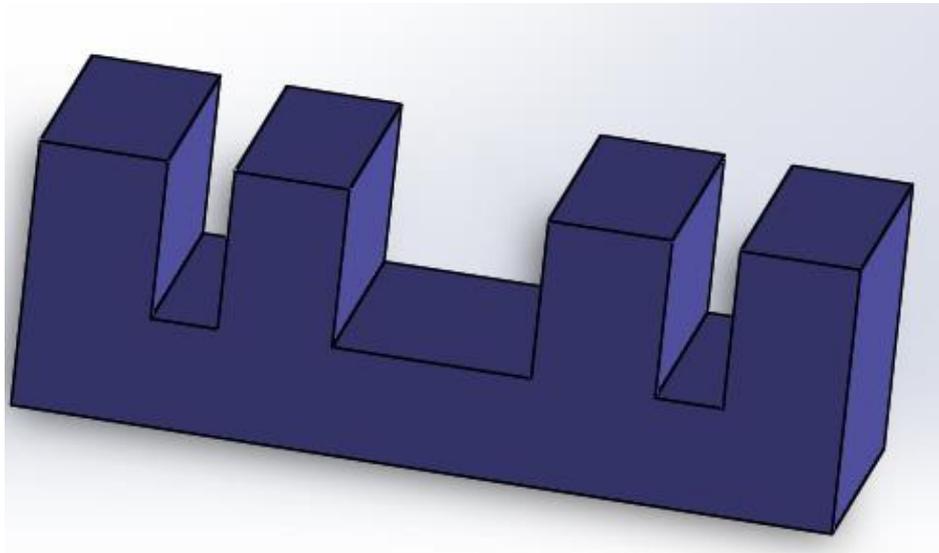


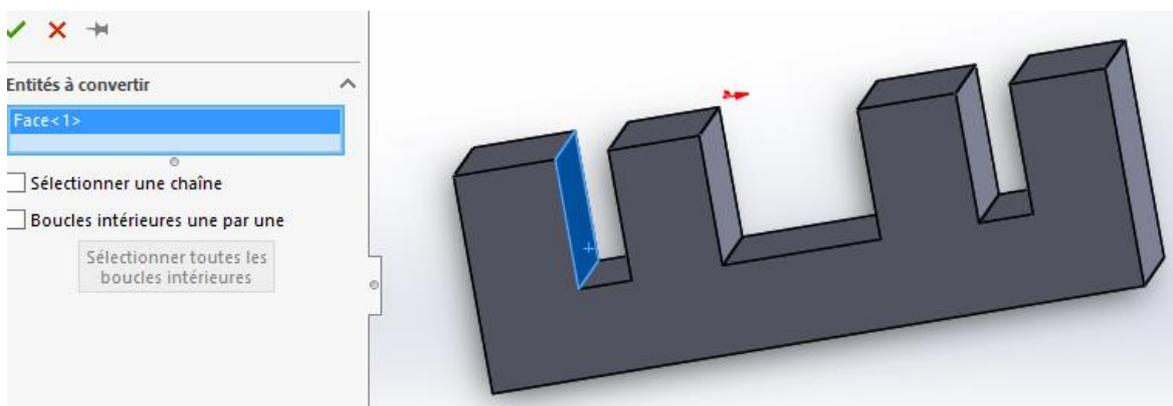
Figure III.38 : Représentation de l'option répétition linéaire et la symétrie du modèle

Après la symétrie on va obtenir le modèle qui convient à notre pièce.(Voir figure III.39)



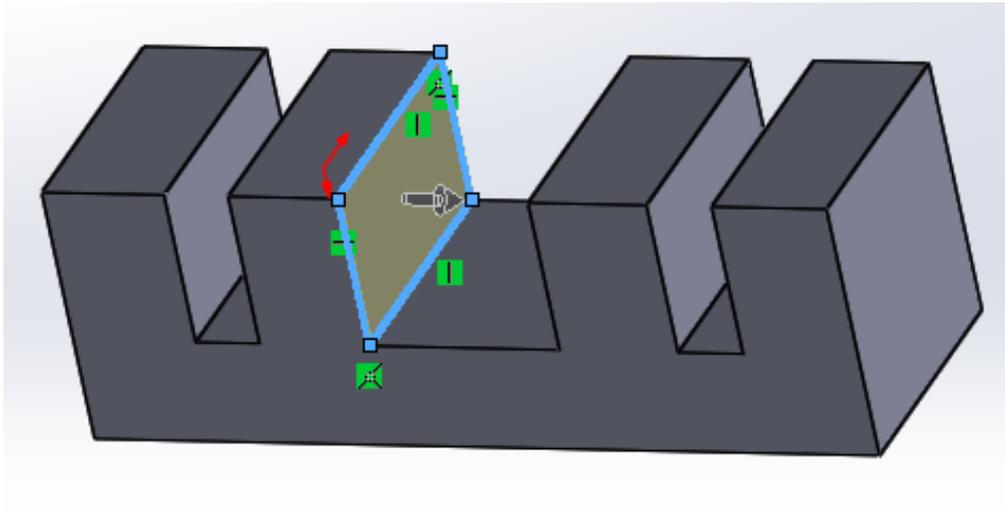
**Figure III.39** : Le modèle après la symétrie

Ce modèle n'est pas un modèle bien défini donc on doit le finaliser avec l'option (convertir les entités) pour modifier les surfaces qui ont des imperfections. (Voir figure III.40)



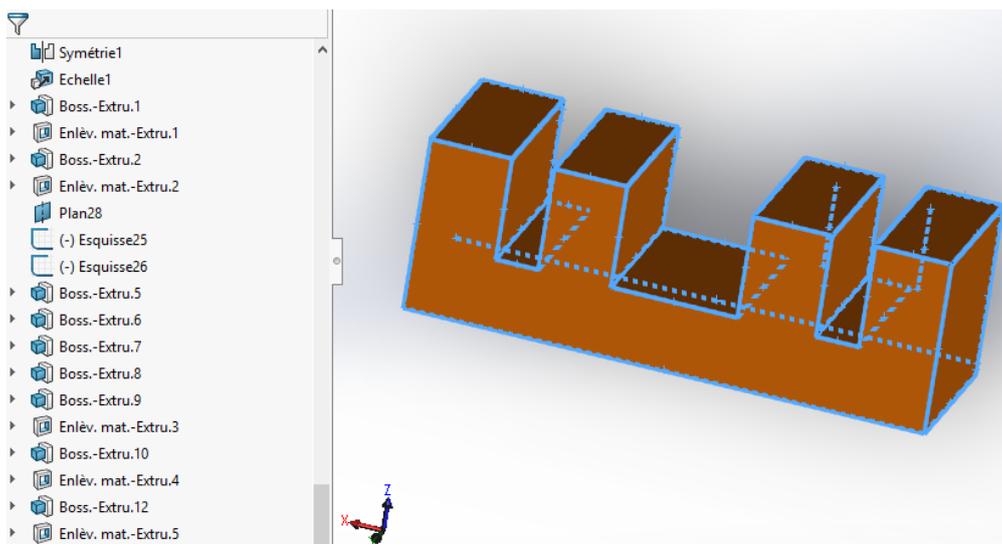
**Figure III.40** : Représentation de la méthode de conversion des surfaces

On va faire le bossage ou l'enlèvement de matière pour compléter les dimensions du modèle. (Voir figure III.41)



**Figure III.41 :** Représentation du bossage des surfaces

Après une longue procédure le modèle final se voit à la figure III.42



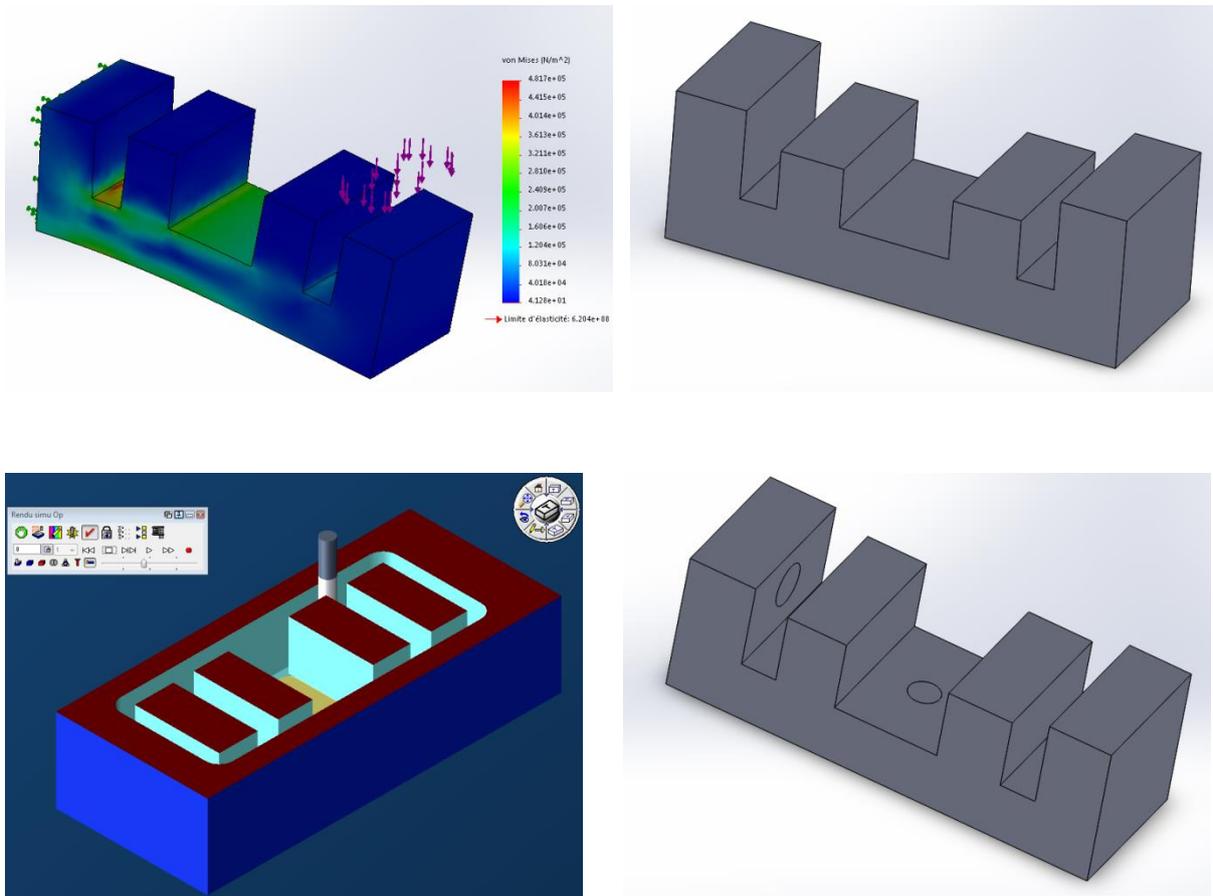
**Figure III.42 :** Représentation du modèle finale

### III.3.5 Usinage de la pièce sur une MOCN

Une fois le modèle CAO de la pièce obtenu, il est possible de l'exploiter pour faire :  
(voir figure III.43)

- la simulation,
- la modification pour améliorer la pièce ou créer des variantes de la pièce originale,

-la génération de programme d'usinage sur machine à CN, etc.



**Figure III.43 :** Exemples d'utilisation du modèle CAO de la pièce étudiée

Dans notre cas, nous allons réaliser le programme d'usinage avec le logiciel de FAO « GibbsCAM » afin d'automatiser l'usinage de la pièce reconstruite.

Pour faciliter l'importation de la géométrie de la pièce dans le logiciel GibbsCAM, nous allons commencer par sauvegarder la pièce sous le format IGES, qui est un format standard d'échange de fichiers entre logiciels hétérogènes comme nous l'avons vu dans le chapitre I. Ce format permet entre autres de garder toutes les informations relatives au modèle BRep de la pièce étudiée.

Nous ouvrons un nouveau projet et nous importons la pièce sous format IGES (voir figure III.44). Sur la même fenêtre du logiciel nous choisissons le type de MOCN sur laquelle nous allons effectuer l'usinage (dans notre cas une fraiseuse verticale 3 axes), le type de matériau de la pièce (Acier allié 4140) ainsi que les dimensions du brut.

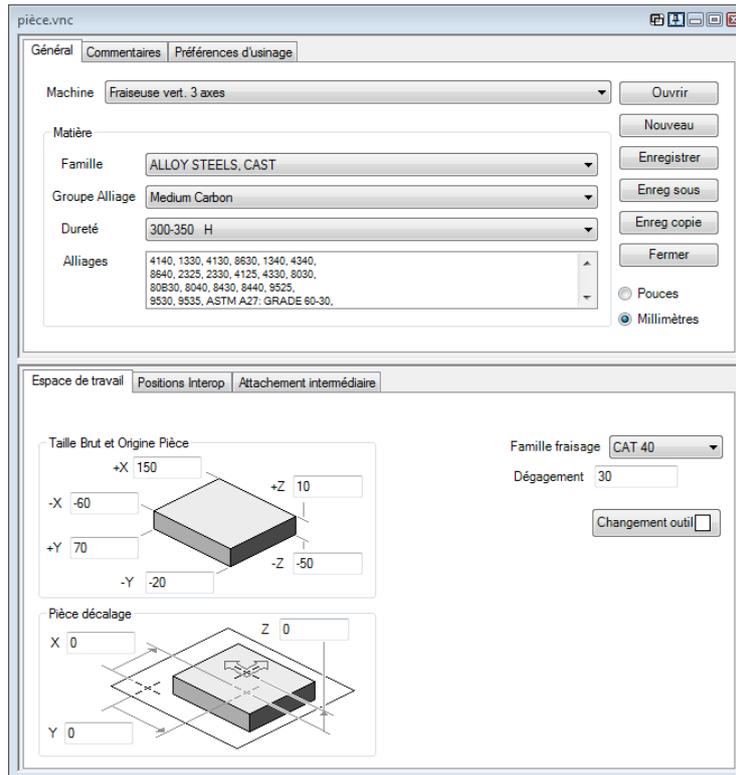


Figure III.44 : Fenêtre de création d'un nouveau projet sur GibbsCAM

La figure III.45 nous montre le résultat une fois la pièce importée dans le logiciel GibbsCAM et positionnée dans le brut.

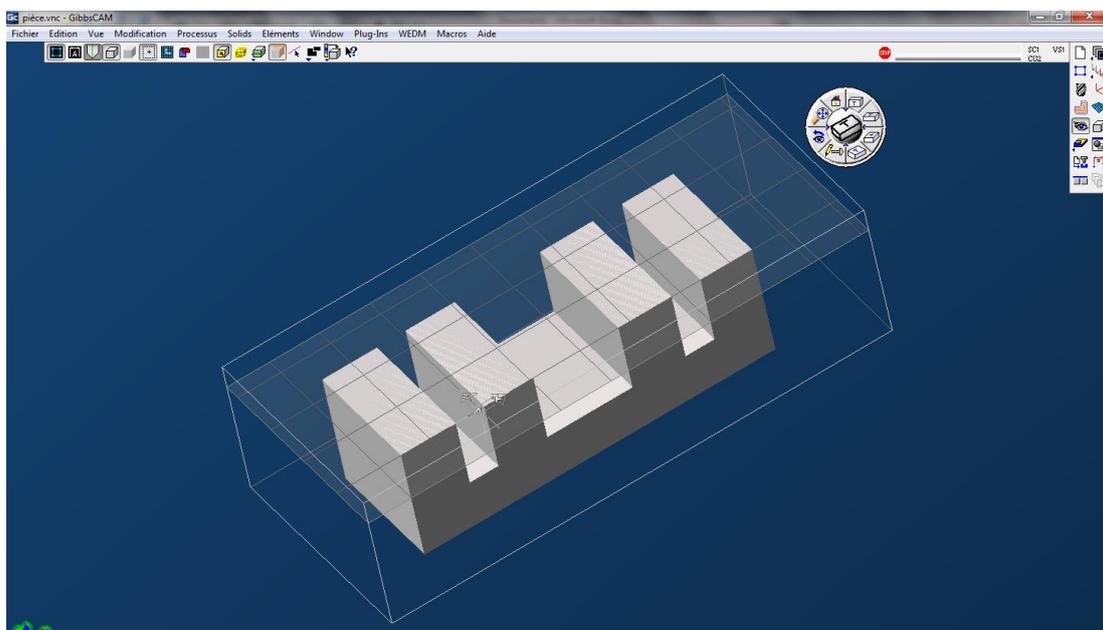
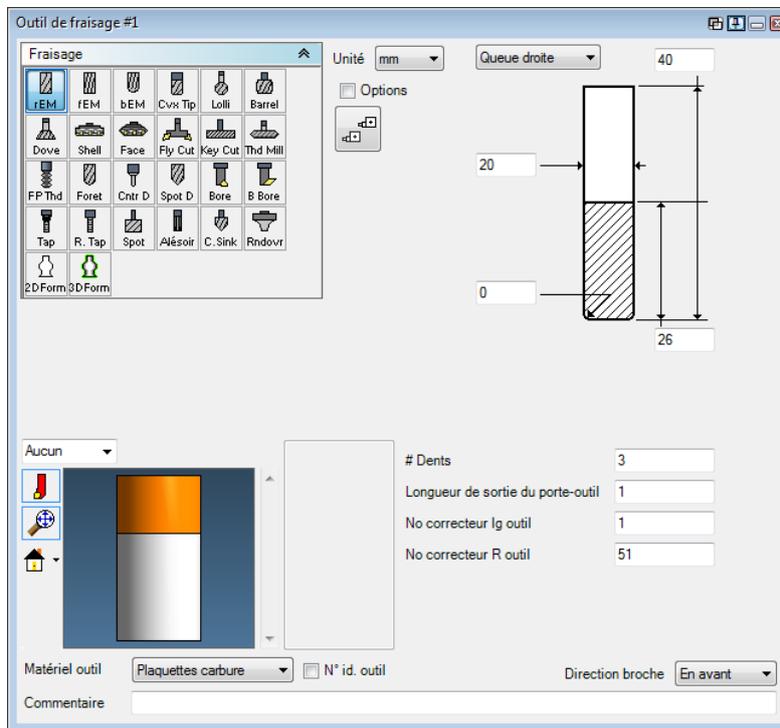


Figure III.45 : Fenêtre de GibbsCAM avec la pièce positionnée dans le brut

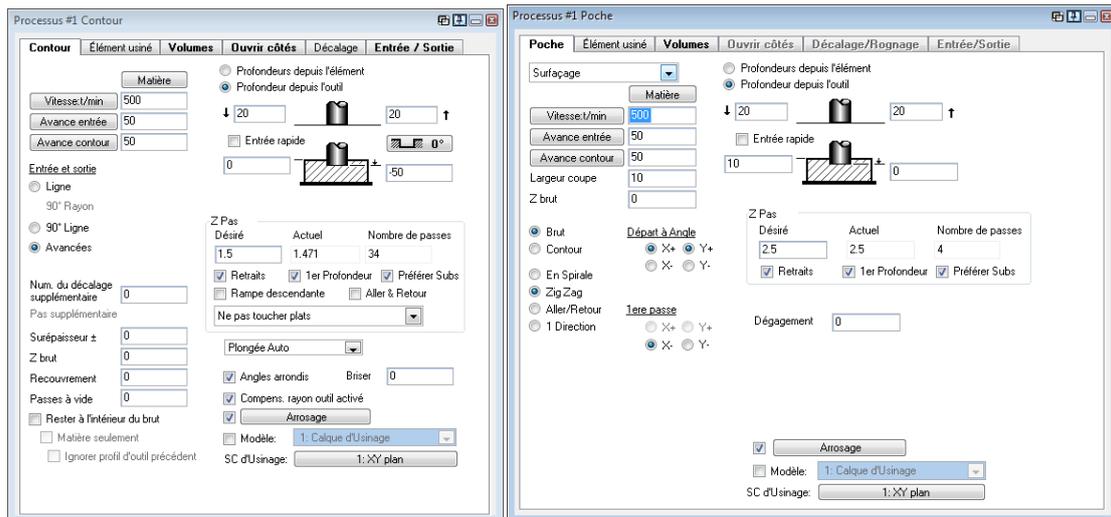
L'étape suivante consiste à définir les outils d'usinage et leurs paramètres respectifs comme sur la figure III.46.



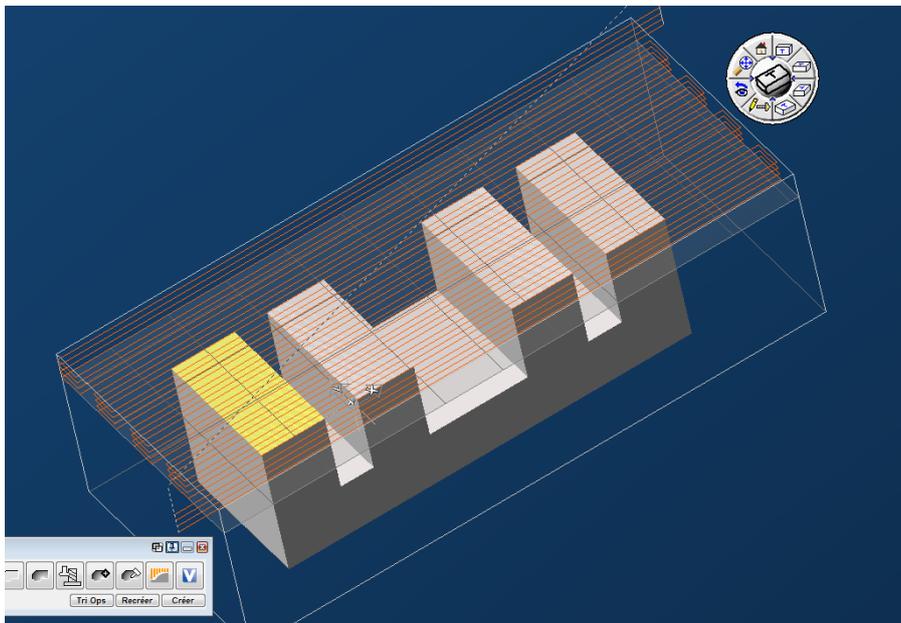
**Figure III.46 :** Fenêtre de définition des outils d'usinage dans GibbsCAM

Nous allons utiliser 3 fraises différentes pour chacune des opérations (surfaçage : fraise  $\phi 20$ , pochage : fraise  $\phi 8$  et contournage : fraise longue  $\phi 8$ ). L'objectif ici est de montrer la faisabilité de l'usinage et non le choix optimal des caractéristiques des outils d'usinage, c'est pourquoi nous avons laissé certains choix par défauts comme le type d'outil HSS.

Une fois les outils définis, nous passons à la partie opération d'usinage. La figure III.47 nous montre l'interface des fenêtres de définition des opérations d'usinage que nous avons utilisé pour générer les trajectoires d'outils relatives à chaque opération. La figure III.48 illustre la trajectoire de l'outil générée pour l'opération de surfaçage de la pièce.

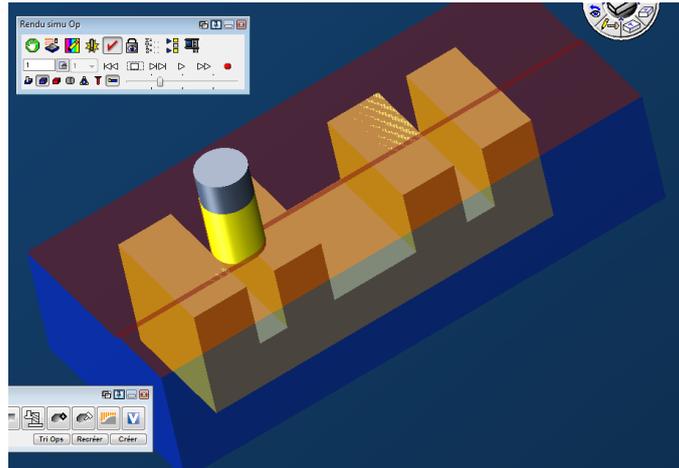


**Figure III.47 :** Fenêtres de définition des opérations d’usinage dans GibbsCAM



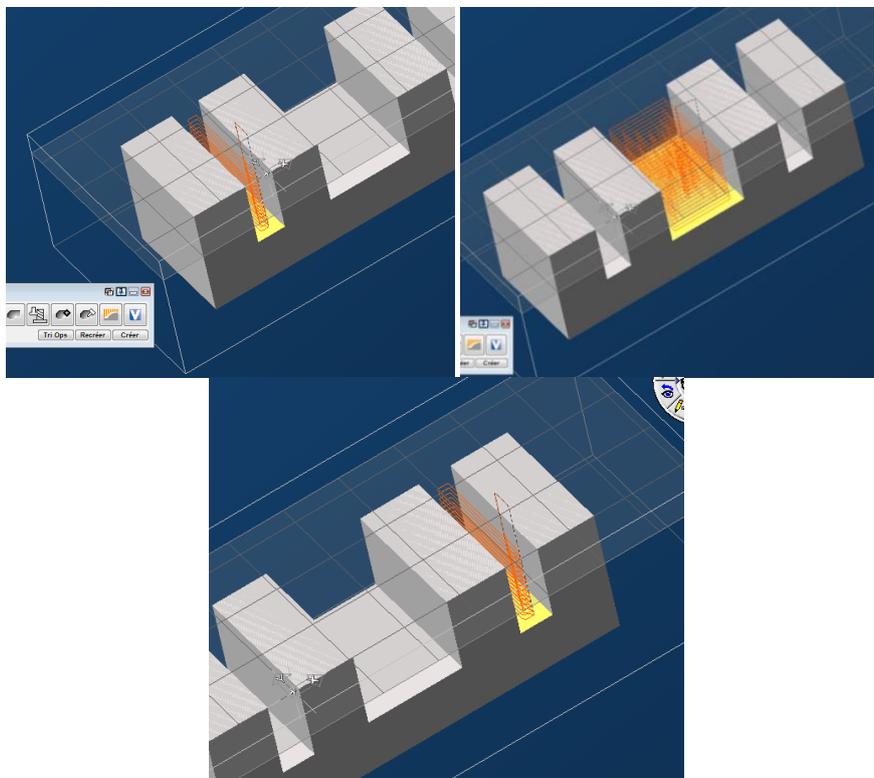
**Figure III.48 :** Génération de la trajectoire d’outil pour l’opération de surfacage dans GibbsCAM

Afin de valider la trajectoire générée, il est nécessaire d’effectuer la simulation d’usinage (voir figure III.49) pour voir les problèmes de trajectoire ou de collision qui peuvent surgir lors de l’opération d’usinage et ainsi éviter les accidents ou la perte de matière première en réajustant les paramètres d’usinage.



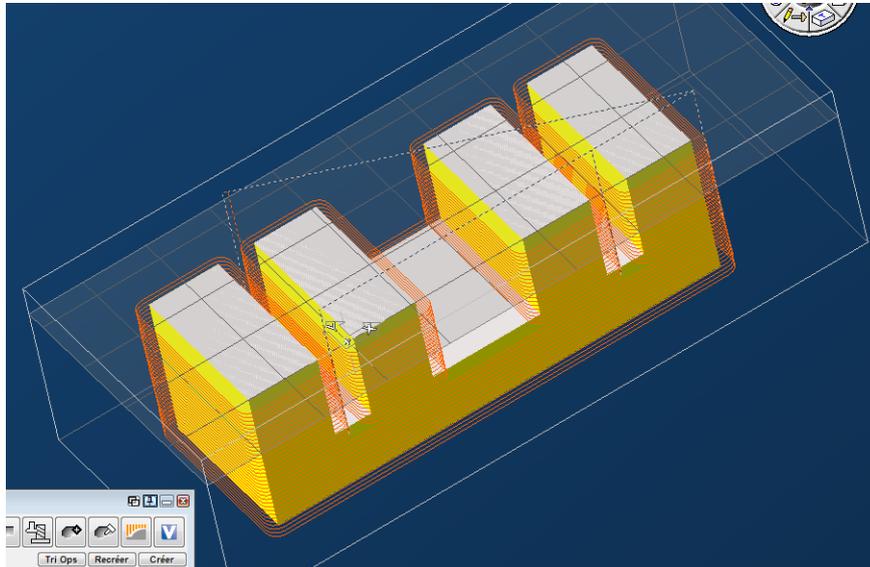
**Figure III.49 :** Simulation d'une opération d'usinage dans GibbsCAM

Une fois l'opération de surfacage effectuée, nous allons générer la trajectoire d'usinage des trois (03) rainures de la pièce en les considérant comme des poches (voir figure III.50). Étant donné que l'usinage s'effectue sur des surfaces indépendantes, il est nécessaire de créer chaque opération d'usinage séparément et d'effectuer sa simulation correspondante pour chacune d'elle.



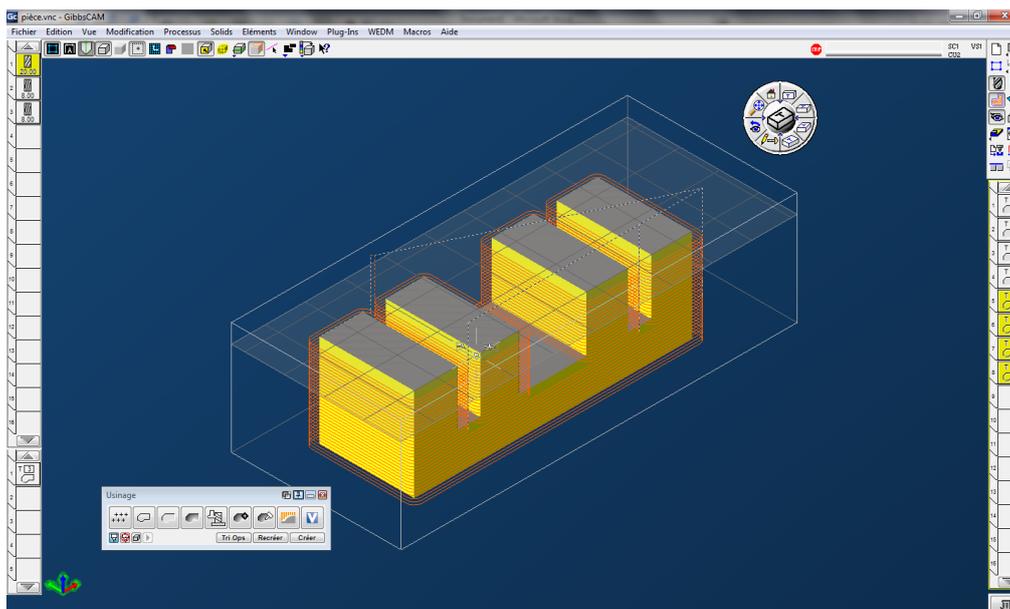
**Figure III.50 :** Trajectoire d'usinage des 3 rainures dans GibbsCAM

Pour finir nous avons réalisé l'opération de contournage du profil de la pièce en usinant les parois des rainures pour enlever la matière non usinée dans l'opération d'usinage des poches (voir figure III.51).



**Figure III.51 :** Trajectoire de contournage du profil de la pièce dans GibbsCAM

La figure III.52 nous montre l'interface du logiciel GibbsCAM avec tous les menus ainsi que la gamme d'usinage finale sur la partie droite. La dernière opération de contournage génère quatre (04) trajectoires distinctes pour usiner le profil décrit précédemment.



**Figure III.52 :** Fenêtre de GibbsCAM avec la gamme d'usinage finie

Une fois la simulation globale de l'usinage de la pièce est effectuée, nous pouvons faire des analyses de matière (voir figure III.53). Nous pouvons aussi voir le temps d'usinage de chaque opération et le temps global. Sans oublier, la possibilité d'exporter toutes les données sous forme de tableau pour le dossier de fabrication et pour finir la génération du programme G-Code pour la machine sur laquelle nous allons réaliser l'usinage (voir figure III.54).

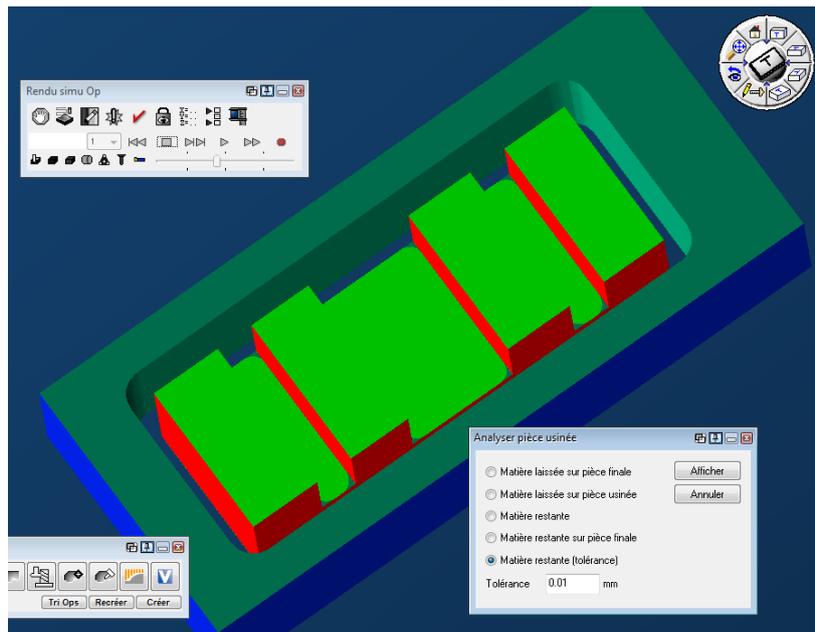


Figure III.53 : Fenêtre d'analyse de la pièce usinée après simulation finale d'usinage

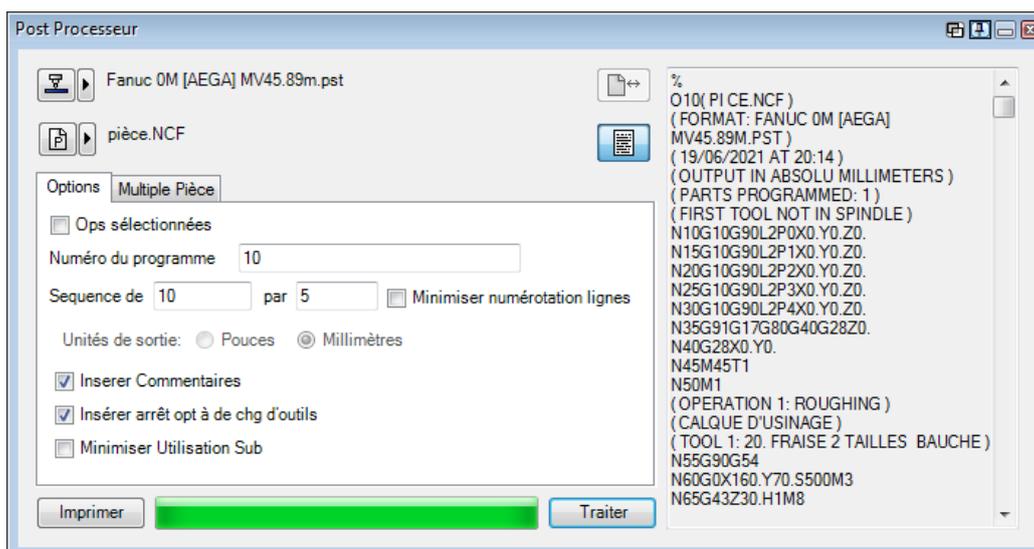


Figure III.54 : Exemple de génération de programme G-code de la pièce pour une fraiseuse verticale avec une commande Fanuc 0M.

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre travail de mise en œuvre du processus de reconstruction des surfaces et de la génération du programme d'usinage sur MOCN à partir du modèle CAO obtenu. Nous avons détaillé chaque étape du processus en illustrant notre travail avec des captures d'écran des nombreux logiciels utilisés pour faciliter la compréhension et permet de reproduire la méthodologie mise en œuvre dans notre mémoire.

Pour atteindre notre objectif nous avons eu affaire à beaucoup de difficulté notamment sur le plan matériel. Prendre des photos de qualité avec un bon éclairage est une tâche difficile pour des personnes qui n'ont pas beaucoup d'expérience dans le domaine et avec des moyens modestes. L'autre aspect de la difficulté vient du nombre important de logiciels qu'il faut maîtriser pour mener à bien le travail.

# **CONCLUSION GÉNÉRALE**

## Conclusion générale

Le travail scientifique que nous avons présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de notre projet de fin d'étude sur la thématique de l'ingénierie inverse et plus particulièrement de la reconstruction de surfaces. Ce domaine est en plein développement et nécessite des moyens considérables. Toutes fois, nous avons pu mettre en œuvre ce processus de reconstruction de surfaces avec des moyens modestes pour reconcevoir le modèle CAO d'une pièce physique en se basant sur la photogrammétrie pour l'acquisition des données géométriques (nuage de points), de logiciels open source pour traiter le maillage ainsi qu'un module spécialisé du logiciel Solidworks et pour finir nous avons généré le programme d'usinage de cette pièce à partir du modèle CAO obtenu.

Pour arriver à ce résultat nous avons d'abord présenté dans le chapitre I des généralités et des définitions sur le domaine de l'ingénierie inverse ainsi que les concepts qui relèvent de cette thématique.

Ensuite, nous avons détaillé le processus de reconstruction de surfaces et des techniques utilisées pour reconcevoir les modèles CAO à partir de nuage de points. Pour faciliter la compréhension nous avons essayé de donner à chaque fois des exemples industriels pour montrer le déroulement du processus de reconstruction de surfaces. Dans ce chapitre, nous avons remarqué le nombre important de paramètres qui influencent la qualité du résultat, d'où l'importance du défi qui nous attendait pour l'étude de cas dans notre mémoire.

Enfin, dans le dernier chapitre nous avons décrit étape par étape le processus que nous avons mis en œuvre pour traiter notre étude de cas. Nous avons eu beaucoup de difficulté avec la méthode de photogrammétrie qui nécessite un matériel spécifique, pour cela nous avons testé la démarche sur plusieurs pièces avant de choisir la pièce prismatique que nous avons étudié. L'autre difficulté était le nombre important de logiciels nécessaire pour passer du nuage de points au maillage et finalement au modèle CAO. Et pour finir, nous n'avons plus beaucoup de temps pour développer la partie FAO, c'est pourquoi nous ne l'avons pas mise trop en avant dans notre mémoire.

Nous sommes fières d'avoir pu atteindre notre objectif malgré les difficultés rencontrées. Ce travail nous a beaucoup appris sur le domaine de l'ingénierie concourante, l'ingénierie inverse et les techniques modernes utilisées en conception mécanique en générale.

Finalement, nous espérons que notre travail sera amélioré dans le futur proche par d'autres étudiants du départements de génie mécanique, et qu'il constituera une base pour ceux qui veulent travailler sur cette thématique de recherche scientifique.

**RÉFÉRENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES ET WEB-  
GRAPIQUES**

## Références Bibliographiques et Web-graphiques

- [1] [http://monge.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2013/reverse\\_engineering/generalite.html](http://monge.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2013/reverse_engineering/generalite.html) . visité la dernière fois le 14/06/2021
- [2] Matthew Berger, Andrea Tagliasacchi, Lee Seversky, Pierre Alliez, Joshua Levine, et « al.. State of the Art in Surface Reconstruction from Point Clouds ».Eurographics 2014 - State of the Art Reports, Avril2014, Strasbourg, France.pp.161-185
- [3] <https://numerisation3d.construction/fonctionnement-photogrammetrie/?v=fa3c7f2b5dae> . visité la dernière fois le 14/06 /2021
- [4] <http://www.bpdesignfrance.com/quest-ce-que-la-retro-ingenierie/> . visité la dernière fois le 14/06/2021
- [5] <https://www.ionos.fr/digitalguide/sites-internet/developpement-web/reverse-engineering-software/> . visité la dernière fois le 14/06/2021
- [6] ALLÈGRE, Rémi, CHAINE, Raphaëlle, et AKKOUCHE, Samir. « Reconstruction dynamique de surface par convection géométrique ». TSI-Technique et Science Informatiques, 2007, vol. 26, no 8, p. 1029.
- [7] KAZHDAN, Michael.« Reconstruction of solid models from oriented point sets ». In : Proceedings of the third Eurographics symposium on Geometry processing. 2005. p. 73-es. Le lien : <https://dl.acm.org/doi/abs/10.5555/1281920.1281931>. visité la dernière fois 20/062021
- [8] Khatamian, A. & Arabnia, Hamid, « Survey on 3D Surface Reconstruction », Journal of Information Processing Systems , janvier 2016,vol 12. P 338-357.
- [9] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme\\_de\\_Vorono%C3%AF](https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_Vorono%C3%AF) . visité la dernière fois le 19/06/2021
- [10] Bernardini, Fausto & Mittleman, Joshua & Rushmeier, Holly. (2000). “The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction”. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 5.
- [11] LOUHICHI, Borhen. « Intégration CAO/Calcul par reconstruction du modèle CAO à partir des résultats éléments finis ». 2008. Thèse de doctorat. Université du Centre. P 16-22 le lien : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00491623/document> . visité la dernière fois le 14/06/2021
- [12] DUCHAINE, François. « Génération de maillage structuré par krigeage avec raffinement elliptique local ». 2004. Thèse de doctorat. École de technologie supérieure. P 8-11 le lien : [https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/700/1/DUCHAINE\\_Fran%C3%A7ois.pdf](https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/700/1/DUCHAINE_Fran%C3%A7ois.pdf) . visité la dernière fois le 17/06/2021
- [13] Philippe Vanackère. « Les modélisations géométriques utilisées dans les logiciels de DAO/CAO ». L'intégration de l'informatique dans l'enseignement et la formation des enseignants, Avril 1992, Châtenay-Malabry, France. pp.123-131. <https://www.epi.asso.fr/revue/dossiers/d12p123.htm> . visité la dernière fois le 18/06/2021

[14] AMEDDAH Hacène, « Modélisation CAO et Stratégies d'usinage pour la réalisation des surfaces à géométrie compliquée (Surfaces Libres) », 2013. Thèse de doctorat, Université de Batna 2.

[15] [http://signoret-col.spip.ac-rouen.fr/IMG/pdf/format\\_fichier.pdf](http://signoret-col.spip.ac-rouen.fr/IMG/pdf/format_fichier.pdf).visité la dernière fois le 17/06/2021

[16] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Initial\\_Graphics\\_Exchange\\_Specification](https://fr.wikipedia.org/wiki/Initial_Graphics_Exchange_Specification)visité .visité la dernière fois le 17/06/2021

[17] <https://www.threekit.com/blog/should-you-use-the-step-file-format> .visité la dernière fois le 17/06/2021

[18] <https://www.reviversoft.com/fr/file-extensions/obj>. visité la dernière fois le 17/06/2021

[19] <https://cabinetdentaire.digital/2020/05/import-de-fichier-ply-avec-model-designer> visité la dernière fois le 18/06/2021

[20] <https://www.lesimpressions3d.com/stl-file-format-3d-printing-simply-explained/> .visité la dernière fois le 17/06/2021

[21] <https://www.online-convert.com/fr/format-fichier/3ds> .visité la dernière fois 17/06/2021[22]

<https://www.file-extension.info/fr/format/wrl>. visité la dernière fois le 17/06/2021

[23] <https://www.studocu.com/fr-ca/document/ecole-de-technologie-superieure/developpement-de-produits-assiste-par-ordinateur/notes-de-cours/notes-de-cours-cours-1/790039/view> .visité la dernière fois le 20/06/2021

[24] <https://info.traceparts.com/fr/blog/le-viewer-cao-3d-multifonctions-de-traceparts-evolue-pour-repondre-aux-besoins-des-concepteurs/> .visité la dernière fois le 22/06/2021

[25] <https://www.lxsim.com/blog/quelles-sont-les-fonctions-de-lanalyse-par-elements-finis-fea/> . visité la dernière fois le 22/06/2021

[26] <https://www.juniorestaca.com/analyse-des-contraintes-par-la-methode-d-elements-finis/>. visité la dernière fois le 22/06/2021

[27] Matthias Eck et Hugues Hoppe. 1996. «Automatic reconstruction of B-spline surfaces of arbitrary topological type». Dans Actes de la 23e conférence annuelle sur l'infographie et les techniques interactives (SIGGRAPH '96). Association for Computing Machinery, New York, NY, États-Unis, 325-334.

DOI: <https://doi.org/10.1145/237170.237271>

[28] Flisch, A. «Industrial Computed Tomography in Reverse Engineering Application». Article publié le 07/1999 visiter le site :

[https://www.researchgate.net/publication/200018530\\_Industrial\\_Computed\\_Tomography\\_in\\_Reverse\\_Engineering\\_Application](https://www.researchgate.net/publication/200018530_Industrial_Computed_Tomography_in_Reverse_Engineering_Application) visité la dernière fois le 10/06/2021

[29] Gerbino, S.; Martorelli, M.; Renno, F.; Speranza, D. «CHEAP PHOTOGRAMMETRY VERSUS EXPENSIVE REVERSE ENGINEERING TECHNIQUES IN 3D MODEL ACQUISITION AND SHAPE RECONSTRUCTION». international design conférence le 17-21,2004. Editeur Marjanovic D. P (749 – 754) visiter le lien :

<https://www.designsociety.org/publication/19831/CHEAP+PHOTOGRAMMETRY+VERSUS+EXPENSIVE+REVERSE+ENGINEERING+TECHNIQUES+IN+3D+MODEL+ACQUISITION+AND+SHAPE+RECONSTRUCTION> . visité la dernière fois le 10/06/2021

[30] Erkan Demir ,Kazim Yildiz,Önder Demir, « Computer Vision Based Intelligent 3D CNC Machines », Conférence sur les innovations dans les systèmes intelligents et les applications (ASYU) à : Istanbul, Turquie le 11/ 2020,

[31] les liens :

<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.creaform3d.com%2Ffr%2Fsolutions-de-metrologie%2Fscanners-3d-portables-handyscan-3d&psig=AOvVaw1w6xxtAwRGcc5jBgcCZu0V&ust=1624538746897000&source=images&cd=vfe&ved=0CAoQjRxqFwoTCPiO39bkrfECFQAAAAAdAAAAABAW>

[https://www.google.com/search?q=laser%20scanner%203d&tbm=isch&tbs=ring:CZIVwpreHz47YbbWb8tAQi3s&hl=fr&sa=X&ved=0CCAQuIBahcKEwjg\\_76c35DxAhUAAAAAHQAAAAAQc&biw=1349&bih=657#imgrc=Rw0Ujlbe8lv2BM](https://www.google.com/search?q=laser%20scanner%203d&tbm=isch&tbs=ring:CZIVwpreHz47YbbWb8tAQi3s&hl=fr&sa=X&ved=0CCAQuIBahcKEwjg_76c35DxAhUAAAAAHQAAAAAQc&biw=1349&bih=657#imgrc=Rw0Ujlbe8lv2BM) .visité la dernière fois le 23/06/2021

[32] Kaushik Yanamandra, Guan Lin Chen, Xianbo Xu, «Reverse engineering of additive manufactured composite part by toolpath reconstruction using imaging and machine learning», Science et technologie des composites, Vol 198,2020,108318,ISSN 0266-3538, visiter les sites :

<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108318>.

[https://www.bftinternational.com/en/artikel/bft\\_Reverse\\_engineering\\_techniques\\_From\\_3D\\_scanning\\_to\\_the\\_CAD\\_file\\_in\\_the\\_3357131.html](https://www.bftinternational.com/en/artikel/bft_Reverse_engineering_techniques_From_3D_scanning_to_the_CAD_file_in_the_3357131.html) visité la dernière fois le 10/06/2021

[33] <https://www.engineeredmechanicalsystems.com/equipment-for-reverse-engineering/>

[34] <https://www.creaform3d.com/it/soluzioni-di-metrologia/macchina-di-misurazione-delle-coordinate-portatile-handypoint-next> .visité la dernière fois le 10/06/2021

[35] le lien :

[https://www.google.dz/imgres?imgurl=https://media.istockphoto.com/photos/automated-cmm-scanning-picture-id1166531776?k%3D6%26m%3D1166531776%26s%3D612x612%26w%3D0%26h%3DvXPGzD-EiNWuBiBDEu4p4w9TqPg6skZezPOJH58ZYFk%3D&imgrefurl=https://www.istockphoto.com/fr/photos/m%25C3%25A9tologie&h=390&w=612&tbnid=HM35GH7Wn7EFsM&tbnh=179&tbnw=281&usq=AI4\\_-kQdxGn60hL0h6PXG6wZdYND3zf6qw&vet=1&docid=vC4Lz9w8ZeEPPM&itg=1&hl=fr-DZ](https://www.google.dz/imgres?imgurl=https://media.istockphoto.com/photos/automated-cmm-scanning-picture-id1166531776?k%3D6%26m%3D1166531776%26s%3D612x612%26w%3D0%26h%3DvXPGzD-EiNWuBiBDEu4p4w9TqPg6skZezPOJH58ZYFk%3D&imgrefurl=https://www.istockphoto.com/fr/photos/m%25C3%25A9tologie&h=390&w=612&tbnid=HM35GH7Wn7EFsM&tbnh=179&tbnw=281&usq=AI4_-kQdxGn60hL0h6PXG6wZdYND3zf6qw&vet=1&docid=vC4Lz9w8ZeEPPM&itg=1&hl=fr-DZ) .visite la dernière fois le 11/06/2021

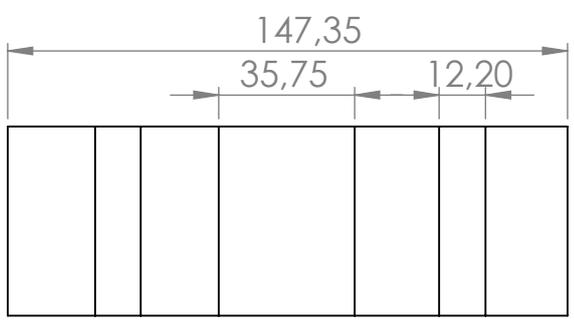
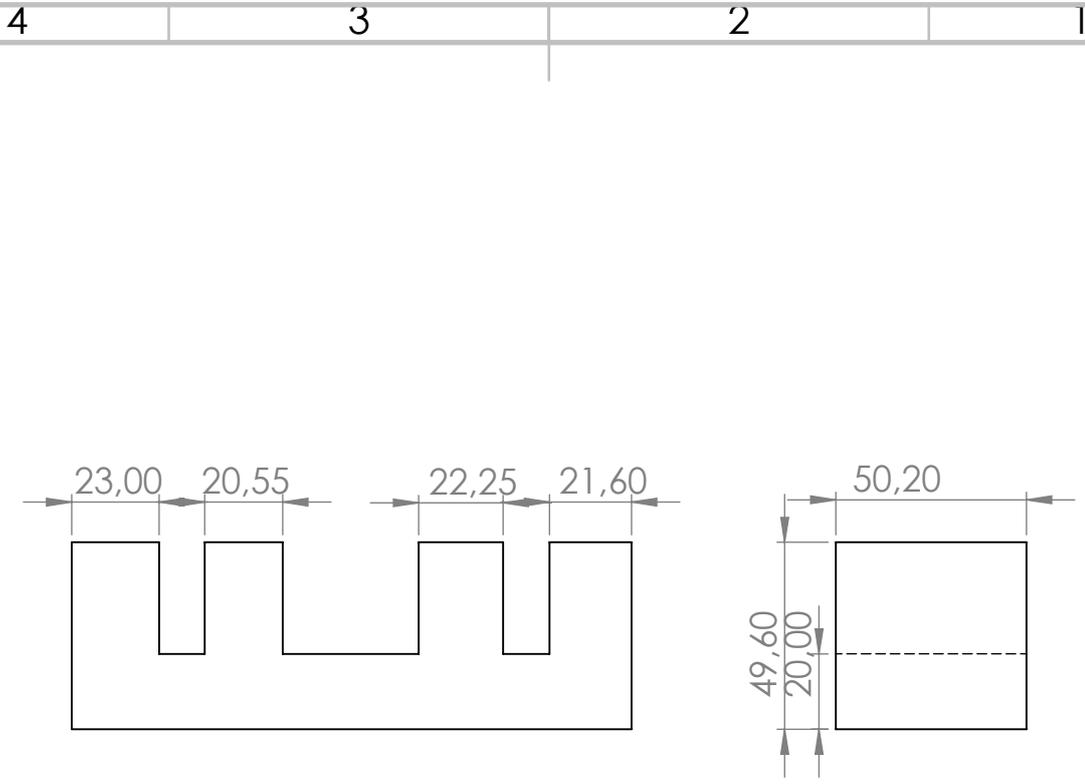
[36] ZHOU Min, Zhongshan Polytechnic, «A New Approach of Composite Surface Reconstruction Based on Reverse Engineering»,Procedia Engineering vol 23 (2011),P594 – 599 , ISSN 1877-7058,

le lien : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705811053951> doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2552>.

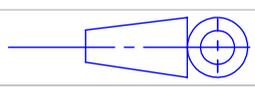
[37] Wang, J., Gu, D., Gao, Z., Yu, Z., Tan, C., and Zhou, L. (January 10, 2013). «Feature-Based Solid Model Reconstruction» ASME. *J. Comput. Inf. Sci. Eng.* March 2013; 13(1): 011004. doi: <https://doi.org/10.1115/1.4023129>

- [38] Jin Liu. (2020) «[An adaptive process of reverse engineering from point clouds to CAD models](#). » International Journal of Computer Integrated Manufacturing 33:9, pages 840-858.
- [39] Francesco buonamici, monica carfagni, rocco furferi, «Reverse engineering modeling methods and tools: a survey», université de Florence, Italy, computer-aided design et applications .2018, VOL. 15, NO. 3, P 443–464 les liens :  
<https://doi.org/10.1080/16864360.2017.1397894>  
<https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/16864360.2017.1397894?scroll=top&needAccess=true> visité la dernière fois le 11/06/2021
- [40] <https://www.youtube.com/watch?v=EA0rHuj88cM> .visité la dernière fois le 11/06/2021
- [41] Manuel du logiciel Meshroom, july 2019 v0.4.5, licence CC, lien :  
[https://docs.google.com/document/d/17HYtYS1tvx053k3\\_nO6Z2GnP2R3cXMIGMN-1W1e3kJE/edit#](https://docs.google.com/document/d/17HYtYS1tvx053k3_nO6Z2GnP2R3cXMIGMN-1W1e3kJE/edit#) . visité la dernière fois le 02/06/2021
- [42] P. Cignoni, M. Callieri, M. Corsini « MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool » édité par V. Scarano, R. De Chiara, and U. Erra, Conférence de la section italienne d'Eurographics , à Visual Computing Lab, ISTI - CNR, Pise Italie en 2008, P 8. lien :  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.649.4449> .visité la dernière fois le 09/06/2021
- [43] <https://www.javelin-tech.com/3d/solidworks-scanto3d/> .visité la dernière fois le 09/06/2021
- [44] <https://www.solidsolutions.co.uk/solidworks/3d-cad/features/reverse-engineering-scanto3d.aspx> .visité la dernière fois le 09/06/2021
- [45] ALI, Salam. « La rétro-conception de composants mécaniques par une approche concevoir pour fabriquer ». Le 1<sup>er</sup> juillet 2015. Thèse de doctorat. Troyes.p191

# **ANNEXE**



Echelle 1:1



A4

Département de Génie Mécanique  
Université Ibn Khaldoun

Mise en plan du pièce reconstruite

BENALLAL  
ABDELHAK  
YAMOUNI  
SARAH WARDA

26/06/2021

4 3 2 1

## الملخص

الهندسة العكسية هي موضوع بحث تطبيقي سريع التطور في القطاع الصناعي. يعتمد على إعادة بناء الأسطح التي تشكل الجزء الأكثر تحديدا وفي نفس الوقت الأصعب للحصول على نتيجة ذات جودة. الهدف من عملنا هو بناء نموذج CAD للجزء الميكانيكي (المادي) الحالي من أجل إنشاء برنامج المعالجة على MOCN والقدرة على إعادة إنتاجه. لتنفيذ عملنا بدأنا باستخدام تقنية القياس التصويري للحصول على سحابة النقاط التي تصف هندسة الجزء ثلاثي الأبعاد. تم تحويل سحابة النقاط هذه إلى شبكة أسهل في التعامل معها. خضعت هذه الشبكة للعديد من المعالجات على برامج محددة من أجل إعادة بناء نموذج CAD النهائي للجزء. أخيرًا، لدينا العديد من الاحتمالات لاستخدام نموذج CAD ولكن في حالتنا استخدمناه لإنشاء برنامج تصنيع الأجزاء على MOCN.

**الكلمات المفتاحية:** الهندسة العكسية، إعادة بناء الأسطح، MOCN، CAD، 3D، القياس التصويري، سحابة النقاط، برنامج التصنيع الآلي.

## Résumé

L'ingénierie inverse est une thématique de recherche appliquée en plein développement dans le secteur industriel. Elle est basée sur la reconstruction des surfaces qui constitue la partie la plus déterminante et en même temps la plus difficile pour obtenir un résultat de qualité. L'objectif de notre travail est de reconstruire le modèle CAO d'une pièce mécanique existante (physique) afin de créer le programme d'usinage sur MOCN et pouvoir la reproduire. Pour réaliser notre travail, nous avons commencé par l'utilisation de la technique de photogrammétrie pour obtenir le nuage de points décrivant la géométrie de la pièce en 3D. Ce nuage de points a été transformé en un maillage plus facile à manipuler. Ce maillage a subi plusieurs traitements sur des logiciels spécifiques pour arriver au final à reconstruire le modèle CAO de la pièce. Pour finir, nous avons plusieurs possibilités d'exploiter le modèle CAO mais dans notre cas nous l'avons utilisé pour générer le programme d'usinage de la pièce sur MOCN.

**Mots clés :** ingénierie inverse, reconstruction des surfaces, modèle CAO, MOCN, photogrammétrie, nuage de points, 3D, maillage, programme d'usinage.

## Summary

Reverse engineering is a rapidly developing applied research theme in the industrial sector. It is based on the reconstruction of surfaces which constitutes the most determining part and at the same time the most difficult to obtain a quality result. The objective of our work is to reconstruct the CAD model of an existing mechanical (physical) part in order to create the machining program on MOCN and be able to reproduce it. To carry out our work, we started by using the technique of photogrammetry to obtain the point cloud describing the geometry of the part in 3D. This point cloud has been transformed into an easier to manipulate mesh. This mesh has undergone several treatments on specific software in order to finally reconstruct the CAD model of the part. Finally, we have several possibilities to use the CAD model but in our case we used it to generate the part machining program on MOCN.

**Keywords:** reverse engineering, surface reconstruction, CAD model, MOCN, photogrammetry, point cloud, 3D, mesh, machining program.