

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

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



Département de Génie Mécanique

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

### MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction mécanique

Présenté par :

CHOUTRI Isaac

### Thème

## Rétro Conception d'une Pièce Complexe

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
AISSI Adel	MCA	Président
ZERGANE Said	MCA	Encadreur
MAKRI Hocine	MCA	Examinateur

Année Universitaire : 2022 / 2023

N° d'ordre : GM/...../2023



## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à mes chers parents, mes chers frères et  
ma chère sœur, mes grands-parents, et à toute ma famille,  
mes chers amis*

*Et à toute la promo 2023*

*Que Dieu vous garde et vous protège.*

## **Remerciements**

*La louange est à Allah Le Clément et Le Miséricordieux et que la prière et le salut de mon Seigneur soient sur son Prophète et son Serviteur*

*Mohammed* 

*Je remercie Dieu qui m'a donné la puissance et la volonté pour arriver à ce stade, mes parents qui ont toujours cru en moi.*

*Au terme de ce modeste travail, je tiens à exprimer ma gratitude et présenter mes vifs remerciements à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à sa réalisation.*

*Je rends un hommage particulier pour mon directeur de recherche, monsieur Said ZORGANE pour ses orientations, ses conseils, ses remarques judicieuses ornées d'encouragements, et sa patience.*

*Tous mes remerciements à tous les membres du bureau d'étude de l'entreprise SAIEG pour ses orientations et ses expériences données au stage*

*Tous mes sentiments les plus reconnaissants aux membres de jury qui ont accepté d'examiner ce travail*

# Listes des figures :

<b>Figure 1.1</b>	Cycle de développement de produit.....
<b>Figure 1.2:</b>	Cycle de vie d'un produit, positionnement de la RC.....
<b>Figure 1.3:</b>	Exemple de rétroconception de l'imprimerie Voirin (Bernard et al.,2007) : (a) une photo de l'imprimerie Voirin et (b) la maquette CAO de l'imprimerie Voirin.....
<b>Figure 1.4:</b>	Exemple de rétro-conception d'un bouchon de Delahaye (Nartz et al., 2002) .....
<b>Figure 1.5:</b>	La RC d'une matrice de dressage, le prototypage en bois modifié à gauche, le modèle CAO paramétré à droite.....
<b>Figure 1.6:</b>	La rétro-conception d'une barre de stabilisatrice (Durupt, 2010) .....
<b>Figure 1.7:</b>	La rétro-conception d'une pompe de direction assistée (Urbanic et al., 2008) .....
<b>Figure 1.8:</b>	La RC d'une aube de turbine usée (Bagci, 2009) .....
<b>Figure 2.1 :</b>	- <i>Cheminement de l'information 3D</i> .....
<b>Figure 2.2 :</b>	- Étapes de la modélisation «tel que construit » .....
<b>Figure 3.1.</b>	- Scanner par triangulation lumière structurée.....
<b>Figure 3.2</b>	- STEINBICHLER COMET L3D 8MP.....
<b>Figure 3.3</b>	- Principe du LiDAR.....
<b>Figure 3.4</b>	- Scanner à impulsion laser.....
<b>Figure 3.5</b>	- Scanner à décalage de phase.....
<b>Figure 3.6-</b>	Scanner Laser 360° RPLIDAR A2M8.....
<b>Figure 3.7</b>	- Scanner par triangulation optique.....
<b>Figure 3.8</b>	- Système de triangulation.....
<b>Fig. 3.9</b>	- Scanner avec contact.....
<b>Figure 3.10</b>	- MMT à portique.....
<b>Figure 3.11</b>	- Machine à mesurer tridimensionnelle .....
<b>Figure 3.12</b>	- Reconstruction photogrammétrique automatique sur base de multiples images.....
<b>Figure 4.1:</b>	Exemple de rétroconception avec Geomagic <sup>TM</sup> .....
<b>Figure 4.2:</b>	Exemple de regroupement de deux modèles en régions (Attene et al.,2006).....
<b>Figure 4.3</b>	un exemple d'une pièce industrielle rétro-conçue avec 3DReshaper.....
<b>Figure 4.4:</b>	Exemple de rétro conception avec CATIA <sup>TM</sup> .....
<b>Figure 5.1 :</b>	le fichier scan.....
<b>Figure 5.2 :</b>	segmentation automatique.....
<b>Figure 5.3 :</b>	Configuration de vecteur 1.....
<b>Figure 5.4 :</b>	Résultat {vecteur 1}.....
<b>Figure 5.5 :</b>	L'axe de cylindre.....
<b>Figure 5.6 :</b>	Configuration de recalage des vecteur 1 et 2.....
<b>Figure 5.7 :</b>	Résultat de recalage des vecteurs 1 et 2.....
<b>Figure 5.8 :</b>	Plan 1 ajouté.....
<b>Figure 5.9 :</b>	Configuration de recalage des plans.....
<b>Figure 5.10 :</b>	La suppression de plan 1.....
<b>Figure 5.11 :</b>	Configuration du l'esquisse de maillage 1.....
<b>Figure 5.12 :</b>	Esquisse de maillage 1.....
<b>Figure 5.13 :</b>	Dessin de diamètre extérieure.....
<b>Figure 5.14 :</b>	Dessin de diamètre intérieur et les cotes de dent.....
<b>Figure 5.15 :</b>	Configuration du motif d'esquisse circulaire de la dent.....
<b>Figure 5.16 :</b>	motif d'esquisse circulaire 1 .....
<b>Figure 5.17 :</b>	Suppression des courbes de l'esquisse de maillage 1.....

<b>Figure 5.18</b>	: Mesurer la hauteur de corp.....
<b>Figure 5.19</b>	: Résultat de l'Extruder 1.....
<b>Figure 5.20</b>	: Comparaison avec le corps original.....
<b>Figure 5.21</b>	: Configuration du l'esquisse de maillage du cercle inférieur.....
<b>Figure 5.22</b>	: Configuration du l'Extruder de cercle inférieur.....
<b>Figure 5.23</b>	: Extraire le plan 1.....
<b>Figure 5.24</b>	: plan 1 ajouté .....
<b>Figure 5.25</b>	: l'Extruder de cercle supérieur.....
<b>Figure 5.26</b>	: Configuration du l'Extraire de plan 2.....
<b>Figure 5.27</b>	: Plan 2 ajouté.....
<b>Figure 5.28</b>	: Configuration de vecteur 4 .....
<b>Figure 5.29</b>	: Création de plan 3.....
<b>Figure 5.30</b>	: Création de plan 4.....
<b>Figure 5.31</b>	: Configuration de l'esquisse de maillage 4.....
<b>Figure 5.32</b>	: L'esquisse de maillage 4.....
<b>Figure 5.33</b>	: Configuration du l'Extruder du l'esquisse de maillage 4.....
<b>Figure 5.34</b>	: Résultat de Extruder 4.....
<b>Figure 5.35</b>	: Répétition circulaire de l'extruder 4.....
<b>Figure 5.36</b>	: Résultat de Booléen 1.....
<b>Figure 5.37</b>	: Création de plan 5.....
<b>Figure 5.38</b>	: Configuration de l'esquisse de maillage 5.....
<b>Figure 5.39</b>	: L'esquisse de maillage 5.....
<b>Figure 5.40</b>	: la courbe hélicoïdale.....
<b>Figure 5.41</b>	: Modification du tangage de la courbe hélicoïdale.....
<b>Figure 5.42</b>	: Résultat de l'insertion de la courbe hélicoïdale .....
<b>Figure 5.43</b>	: Configuration du l'enlèvement de matière avec balayage .....
<b>Figure 5.44</b>	: L'enlèvement de matière avec balayage (Balayage 1).....
<b>Figure 5.45</b>	: Ajouter le congé sur le cercle supérieur .....
<b>Figure 5.46</b>	: Ajouter le congé sur le cercle inférieur.....
<b>Figure 5.47</b>	: Ajouter le congé sur les faces des dents.....
<b>Figure 5.48</b>	: Ajouter le congé sur les côtés des dents.....
<b>Figure 5.49</b>	: Ajouter les chanfreins aux bas des dents.....
<b>Figure 5.50</b>	: Ajouter les chanfreins sur l'hélice.....
<b>Figure 5.51</b>	: Etat finale de la pièce.....
<b>Figure 5.52</b>	: Configuration de pignon sur GEAR TRAX.....
<b>Figure 5.53</b>	: Résultat du l'assemblage des pignon sur SOLIDWORKS.....
<b>Figure 5.54</b>	: Dessin technique de pignon sur SOLIDWORK.....

# Table de matière :

Introduction générale.....	1
<b>1.LA RETROCONCEPTION.....</b>	<b>2</b>
1.1 Introduction à la rétro-ingénierie.....	3
1.2 Qu'est-ce que l'ingénierie inverse (rétroconception) ?.....	3
1.3 Pourquoi utiliser la rétro-ingénierie ?.....	4
1.2. Les étapes de la modélisation 3D.....	8
1.2.1.	
Introduction.....	8
1.2.2. Phase 1 : Acquisition de données numériques 3D.....	8
1.2.2.1. Relevés manuels.....	8
1.2.2.2. Relevés automatisés.....	9
1.2.3. Phase 2 : Traitement des données de la reconstruction 3D.....	9
1.2.3.1 Intégration de nuages de points.....	10
1.2.3.2 Segmentation.....	10
1.2.3.3 Maillage / modelage.....	11
1.2.3.4. Exportation des données.....	11
<b>2. Scanners 3D et Logiciels utilisés dans le domaine de La RETROCONCEPTION .....</b>	<b>13</b>
2.1. Scanners 3D pour la rétro-ingénierie.....	14
2.1.1 Principe de fonctionnement.....	14
2.1.2 Scanner par triangulation lumière structurée.....	15
2.1.3 STEINBICHLER COMET L3D 8MP.....	16
2.1.4 Autres types de scanners utilisés dans la retro-conception.....	17
2.1.4.1Scanner laser.....	17
2.1.4.2. Scanner par triangulation optique.....	19
2.1.4.3 Scanner avec contact.....	20
2.1.4.4. Les machines à mesurer tridimensionnelles (MMT).....	21
2.1.4.5. Photogrammétrie.....	22
2.2. Logiciels utilisés dans la rétro ingénierie.....	23
2.2.1 GeomagicTM.....	23
2.2.2 Effisoft.....	24
2.2.3 La société Nikon MetrologyTM.....	25

2.2.4. DReshaper™.....	25
2.2.5. CATIATM: Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée.....	25
<b>3. La rétro conception d'un pignon de démarreur du moteur général Electric.....</b>	<b>27</b>
3.1 INTRODUCTION.....	28
3.2. Définition des programmes.....	28
3.2.1 GEOMAGIC DESIGN X.....	28
3.2.2 GEAR TRAX.....	28
3.2.3 SOLIDWORKS.....	28
3.3 Etapes de la retro conception.....	29
3.3.1. ETAPE 1 : La génération numérique Sur GEOMAGIC DESIGN X.....	29
3.3.2. ETAPE 2 : Créer un pignon avec Le programme GEARTRA.....	55
3.3.3. ETAPE 3 : Assemblage Des Pignons sur SOLIDWORKS.....	56
3.3.4. ETAPE 4 : Mise en plan de la pièce.....	57
Conclusion générale.....	59
Bibliographie.....	60
Résumé.....	63
Abstract.....	64
ملخص.....	65



## Introduction générale :

Dans un environnement de fabrication. En fait, nous croyons que les principales caractéristiques de l'ingénierie inverse dite retro conception (RC) s'agissent de la remise à neuf d'un produit, d'une pièce ou d'un assemblage. Or, le procédé de rétro-ingénierie, dans la littérature, permet de trouver d'abord un modèle CAO par une technique de scan, ce modèle est paramétrique et difficile à modifier. C'est seulement à partir de ce modèle CAO et l'utilisation de logiciel FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) qu'une gamme de fabrication est générée.

Dans le travail présenté, on propose la méthode d'ingénierie inverse pour un démarreur (pignon) de moteur général Electric à cause du manque d'un dessin technique de la pièce à réalisée

Il existe plusieurs façons de mesurer des objets lors de la numérisation 3D. Il s'agit notamment des scanners laser, des scanners optiques, des scanners à lumière structurée, Sur notre thèse on a utilisé un scanner à la lumières structurée qui est LE STEINBICHLER COMET L3D. Sa technologie de balayage à lumière structurée permet un balayage rapide et de haute précision. Les scanners à lumière structurée fonctionnent en projetant des motifs de lumière sur l'objet à scanner. Ces motifs peuvent être déformés, ce qui est enregistré par la caméra du scanner.

A fin de réaliser cette opération le fichier scan sera importé sur un programme de retro conception, la rétro conception de notre pignon était sur le programme de Geomagic design X qu'il est l'un des logiciels qui ont des fonctions les plus puissantes pour la rétroconception. Dans ce logiciel, on peut modifier le maillage et le nuage de points et les surfaces construites. Aussi on peut d'extraire des surfaces orientées et de créer des surfaces CAO. On peut reconnaisse automatiquement les type de surface (cylindre, plan, sphère, cône) et des surfaces à bases de contours (extrusions et révolutions, balayage) faire Des opérations d'enlèvement de matière, d'extrudions et de révolution, utilisant comme esquisse les contours détectés, peuvent être exécutées.

Après la réalisation de cette phase sur geomagic , on a proposé une comparaison avec assemblage du deux pignon, à l'aide du programme gear trax qui est un outil orienté par la propriété de programme de conception d'engrenages, fournit au concepteur un outil facile à utiliser pour créer des solides , après des calculs détaillés dans le chapitre 3 on a réussi de créer un nouveau pignon similaire par rapport au pignon de modèle du geomagic , finalement le dessin technique de la pièce finale a été effectué sur solidworks .

Ce mémoire de thèse sera composé de trois chapitres :

Sur le chapitre 1 sous le titre de Retroconception on a défini la retro conception et le but de son utilisation, puis ses étapes

Le chapitre 2 sous le titre de Scanners 3D et Logiciels utilisés dans le domaine de La RETROCONCEPTION parle sur les techniques de scan 3d et les logiciels utilisés dans le domaine de la rétro conception

Dans le chapitre 3 sous le titre de La rétro conception d'un pignon de démarreur du moteur général Electric\_on a détaillé les étapes de la retro conception du pignon

Nous finirons ce mémoire par la conclusion générale qui reprend les principaux résultats de cette recherche

*CHAPITRE 1*  
*LA RETROCONCEPTION*

## 1.1 Introduction à la rétro-ingénierie

Dans le domaine de la CAD/CAM et du prototypage rapide, l'ingénierie inverse (RE) ou la rétro-conception est une technologie qui offre des avantages commerciaux significatifs en réduisant le cycle de développement des produits. Elle permet de fermer la boucle entre ce qui est "conçu" et ce qui est "réellement fabriqué". La figure 1.1 illustrée ci-dessous met en évidence les possibilités offertes par l'ingénierie inverse pour établir une rétroaction entre ces deux aspects. Ce qui est « tel que conçu » et ce qui est « réellement fabriqué ».

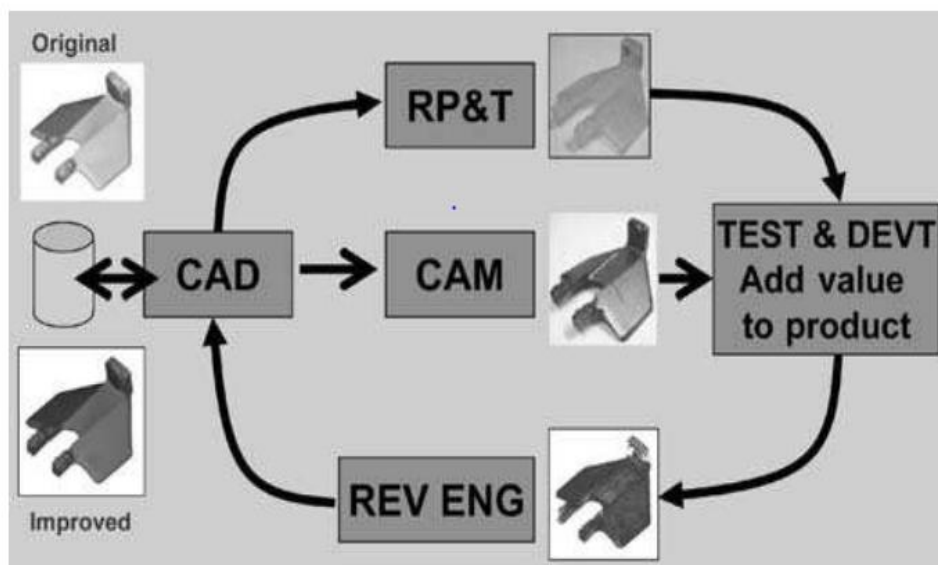


Fig. 1.1 Cycle de développement de produit

## 1.2 Qu'est-ce que l'ingénierie inverse (rétro-conception) ?

L'ingénierie englobe le processus de conception, de fabrication, d'assemblage et de maintenance des produits et des systèmes. Deux types d'approches d'ingénierie sont couramment utilisés : l'ingénierie directe et l'ingénierie inverse. L'ingénierie directe suit le processus traditionnel de passer des abstractions de haut niveau et des conceptions logiques à la mise en œuvre physique d'un système. Cependant, il peut arriver qu'un produit physique existe sans les détails techniques tels que des dessins ou des nomenclatures, ce qui nécessite une approche différente. La rétro-ingénierie est le processus de duplication d'une pièce, d'un sous-ensemble ou d'un produit existant sans avoir accès à des dessins, à une documentation ou à un modèle informatique **[Motavalli & Shamsaasef 1996]**. **[Abella et al. (1994)]**. Il s'agit essentiellement d'obtenir un modèle géométrique en 3D à partir de points acquis par le biais de scans ou de numérisations de pièces ou de produits existants. Ce processus de capture numérique des entités physiques d'un composant est largement utilisé dans diverses applications telles que la fabrication, le design industriel et la reproduction de bijoux.

La rétro-ingénierie trouve également son utilité dans des domaines tels que l'automobile, où les fabricants concurrents peuvent acheter un modèle et le démonter pour comprendre sa construction et son fonctionnement. Dans le domaine du génie logiciel, la rétro-ingénierie peut être utilisée pour étudier et s'inspirer du code source existant afin de créer un code source similaire et de qualité. Un autre aspect important de la rétro-ingénierie est sa contribution à la compression des cycles de développement des produits **[Yau et al. (1993)]**. Dans un marché mondial concurrentiel, les fabricants cherchent constamment des moyens de réduire les délais de mise sur le marché de nouveaux produits.

Le développement rapide de produits (RPD) englobe les technologies et les techniques qui aident les fabricants et les concepteurs à répondre aux exigences de délais de développement plus courts. Par exemple, dans le domaine de l'injection plastique, il est crucial de raccourcir les délais de conception et de fabrication des moules. Ainsi, la rétro-ingénierie offre une solution pour obtenir des informations précises sur les produits physiques existants et peut contribuer à la compression des délais de développement des produits [(reverse engineering -Vinesh raja/kiran J fernandes )]

### 1.3 Pourquoi utiliser la rétro-ingénierie ?

La rétro-ingénierie est une pratique qui peut être appliquée à des objets de différentes tailles, allant des avions aux puces électroniques. Elle joue un rôle à diverses étapes du cycle de vie d'un produit (Fig. 1.2). Cette pratique est devenue plus répandue grâce aux améliorations des techniques de numérisation (telles que ROMERTM) et aux performances accrues des algorithmes de reconnaissance géométrique. Au fil des années, plusieurs raisons spécifiques à l'industrie ont été identifiées comme des moteurs de la rétro-ingénierie. Ces principales raisons sont illustrées dans la figure ci-dessous.

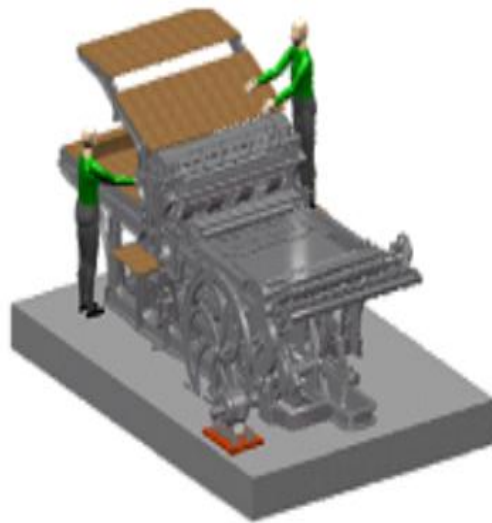


Fig. 1.2 Cycle de vie d'un produit, positionnement de la RC.

L'absence de documentation adéquate ou suffisante pour la conception initiale. Cela peut être le cas dans des domaines tels que la muséologie et la préservation du patrimoine industriel, où il peut y avoir un manque d'informations sur la structure du produit. Il n'y a pas de plans ni de schémas disponibles, seule la partie physique du produit est disponible. À cet égard, la figure 1.3 présente un exemple de rétro-ingénierie d'une presse Voirin. **(Bernard et al., 2007).**



(a)



(b)

Fig. 1.3 l'imprimerie Voirin - (b) la maquette CAO de l'imprimerie Voirin.

Le fabricant d'origine du produit n'est pas disponible ou ne produit plus le produit, bien qu'il devrait le faire. Cela se produit souvent dans les secteurs du transport et de la défense pour des pièces durables. L'objectif de la rétro-ingénierie dans de tels cas est d'améliorer la fabrication de pièces obsolètes en produisant des pièces de rechange. Ainsi, ces pièces de rechange doivent être conçues et fabriquées en utilisant les technologies actuelles afin d'améliorer les performances et la durabilité globales. Un exemple de cela est la rétro-ingénierie du bouchon de refroidisseur d'eau Delahaye 135 (Nartz et al., 2002). Dans ce cas, le connecteur d'origine doit être remplacé par un modèle modifié. Cette version spécifique de la calandre concave du Delahaye 135 n'a été produite que pendant deux ans (1935-1937), ce qui la rend extrêmement rare.

La pièce a subi des modifications et ne correspond plus à la conception d'origine, et la documentation associée (plans, etc.) n'a pas été mise à jour en conséquence. Cette situation est courante pour les pièces ayant une longue durée de vie, mais elle est particulièrement prévalente pour les pièces vieillissantes.



Fig. 1.4 Rétro-conception d'un bouchon de Delahaye

En raison des réparations effectuées sur des pièces produites en quantités limitées, telles que

des soudures, des retallages, etc., il peut être difficile de trouver des pièces de rechange correspondantes. Ces modifications apportées aux pièces ne sont généralement pas reflétées dans les dessins d'origine. Un exemple illustratif est le cluster NOGENTECH et la matrice d'habillage fournie par ESTAMFOR, où le seul élément disponible est un prototype en bois de la matrice. Il s'agit d'un modèle CAO paramétrique avec une arborescence complète, qui a nécessité des efforts de rétro-ingénierie pour permettre la production adaptée aux différentes formes de presse.

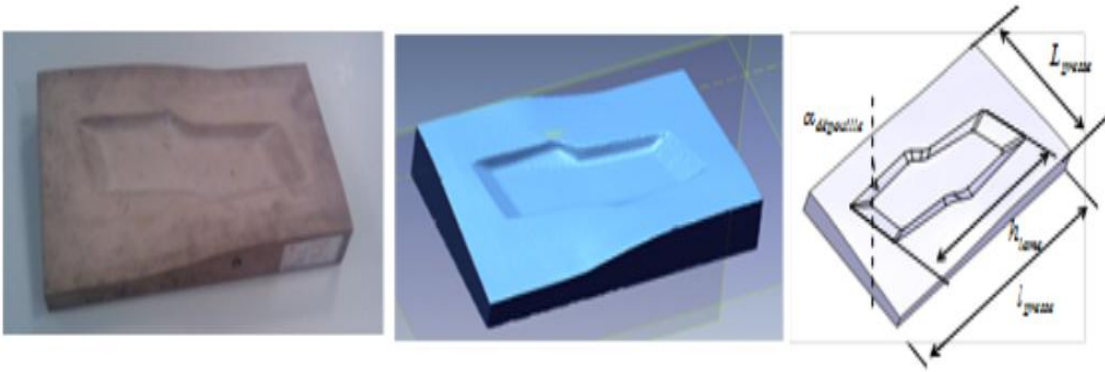


Fig. 1.5 La RC d'une matrice de dressage, le prototype en bois modifié à gauche, le modèle CAO paramétré à droite.

Le modèle CAO initial n'inclut pas toutes les informations nécessaires pour prendre en compte les modifications requises. Cela peut être dû à des restrictions de protection juridique ou commerciale, empêchant le fournisseur de fabrication d'obtenir toutes les données pertinentes. Dans ces cas, l'ingénierie inverse est utilisée et des ajustements sont apportés pour mieux s'adapter à l'environnement de production. Un exemple illustratif est la rétro-ingénierie des barres stabilisatrices automobiles (**Drupt, 2010**). Dans ce projet, le constructeur automobile ne fournit qu'un modèle de surface générique au fournisseur de barres, qui doit ensuite effectuer des calculs par éléments finis, rétro-concevoir la barre, apporter des modifications au modèle CAO et le renvoyer au client pour validation. La figure 1.6 présente le modèle CAO basé sur le nuage de points et la barre

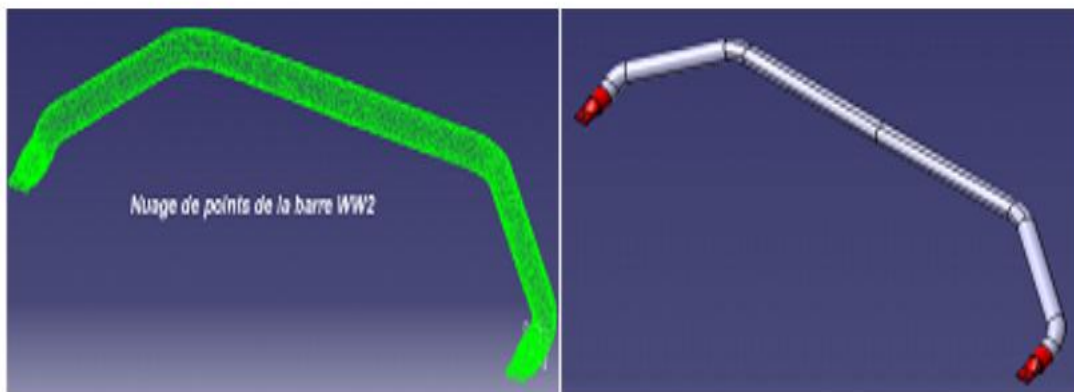


Fig. 1.6 La rétro-conception d'une barre de stabilisatrice

Cela vise à améliorer les performances ou les fonctionnalités du produit. Dans ce contexte, il s'agit de pièces mal conçues qui nécessitent une mise à jour pour assurer un bon fonctionnement. Un exemple illustratif est l'ingénierie inverse des pompes de direction assistée qui présentent des défauts de conception graves (**Urbanic et al., 2008**). Des rayons de congé excessifs ont entraîné des concentrations de contraintes mécaniques, provoquant des fissures et des dommages au niveau de la gorge. Ainsi, la conception d'origine doit être révisée. La figure 1.7 présente la pompe à rétro-

concevoir ainsi que le modèle CAO correspondant.

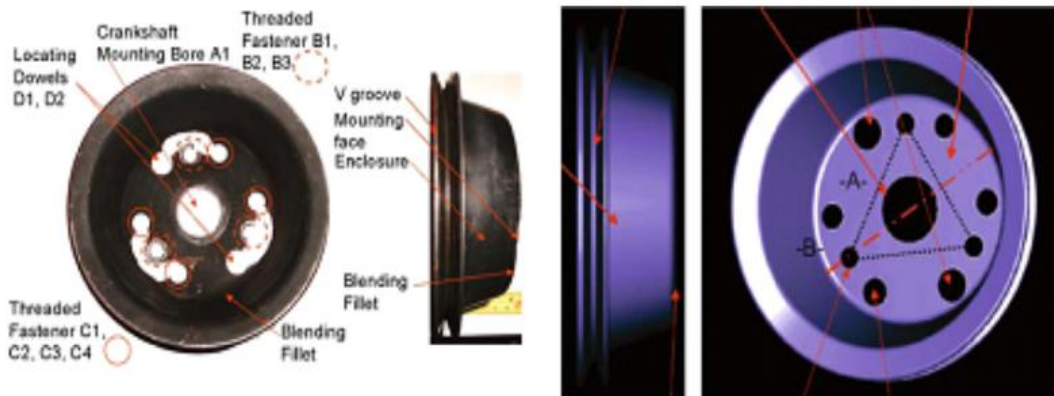


Fig. 1.7 La rétro-conception d'une pompe de direction assistée (Urbanic et al., 2008)

Mettre à jour les matériaux obsolètes et les processus de fabrication dépassés. Cette situation concerne des pièces anciennes, telles que les pièces de monnaie. L'objectif de la rétro-ingénierie dans ce contexte est de recréer ces pièces en utilisant les matériaux et les méthodes de fabrication actuels. Un exemple concret est le projet VPERI (VPERI, 2003). Le besoin de rétro-ingénierie était de moderniser le produit au niveau du processus de fabrication. En effet, les composants sont usés ou défectueux et aucune source d'approvisionnement n'est disponible. Dans ce contexte, il s'agit de pièces plus anciennes qui ont subi des changements de forme en raison de l'usure. De plus, les données d'origine de ces pièces ne sont plus accessibles. Un exemple pertinent est la rétro-ingénierie des pales de turbine usées (Bagci, 2009), comme nous montre la figure 1.8 pour une turbine endommagée et son modèle CAO obtenu par la la rétro-conception.

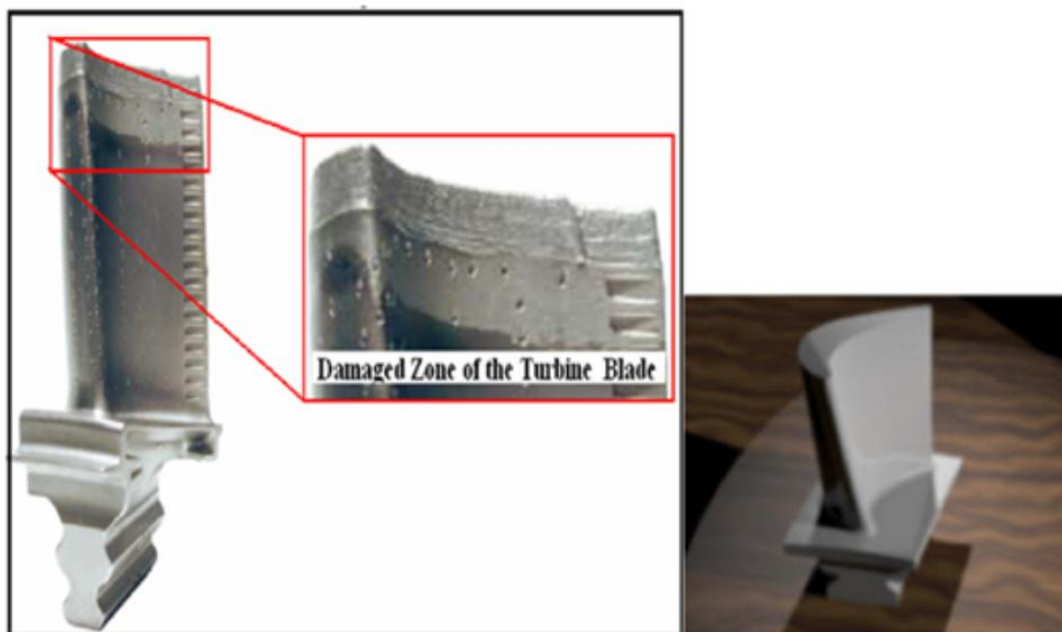


Fig. 1.8 La RC d'une aube de turbine usée (Bagci, 2009).

La rétro-ingénierie peut également être utilisée pour analyser et acquérir des connaissances sur la fabrication et les fonctionnalités des pièces concurrentes. Bien que cette raison soit souvent

considérée comme secondaire, elle est souvent négligée par les fabricants. Nous reconnaissons que les exigences en matière d'ingénierie inverse sont vastes et diverses, couvrant à la fois des composants traditionnels et modernes. Les exemples mentionnés ci-dessus ne représentent qu'une partie des raisons industrielles et ne sont pas un résumé exhaustif. En pratique, ces raisons sont difficiles à quantifier et leurs origines sont variables. Cet article est lié au pôle de compétitivité NOGENTECH (<http://www.cluster-nogentech.com>) situé dans la région de Nogent (France), regroupant une cinquantaine d'entreprises spécialisées dans la forge, la métallurgie, la plasturgie, etc. Le problème de rétro-ingénierie résolu par ce cluster se présente fréquemment. Par conséquent, la rétro-ingénierie n'est pas une activité ponctuelle, mais une pratique quotidienne. Sur le marché actuel, de nombreux produits logiciels répondent aux besoins de l'industrie et soutiennent les activités de rétro-ingénierie. Ces logiciels permettent de récupérer des modèles CAO à partir de données figées couramment utilisées.

## ***1.2. Les étapes de la modélisation 3D***

### ***1.2.1. Introduction***

L'ingénierie inverse consiste à créer un modèle CAO numérique 3D d'un produit, d'une pièce ou d'un objet physique existant. Son principe repose sur la capture d'un nuage de points représentant la surface de l'objet à numériser. Ce nuage de points est ensuite traité à l'aide d'un logiciel de reconstruction de surface qui crée initialement un modèle polygonal utilisé pour l'usinage, la simulation et le prototypage rapide. Par la suite, des surfaces NURBS (acronyme pour "non-uniform rational basis spline") sont générées, permettant ainsi d'obtenir une représentation numérique précise de la pièce. Ce modèle numérique peut ensuite être exporté vers des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) pour être modifié et ajusté en vue d'une utilisation ultérieure.

La rétro-ingénierie se déroule sur les phases suivantes :

### ***1.2.2. Phase 1 : Acquisition de données numériques 3D***

#### ***1.2.2.1. Relevés manuels***

Avant l'avènement des techniques d'acquisition numérique de données 3D, il est important de comprendre les techniques traditionnelles utilisées lors des relevés manuels. Dans un premier temps, le relevé d'architecture consiste en une représentation graphique d'une structure existante. Il est réalisé dans le cadre de projets de rénovation, de restauration ou d'interventions sur des bâtiments existants. L'objectif est de mettre à jour la documentation existante (plans, coupes, élévations) en tenant compte des éventuelles transformations subies par le bâtiment au fil du temps. Les outils couramment utilisés dans les relevés manuels comprennent le matériel de dessin, un télémètre laser, un (double-)décamètre, un mètre, un fil à plomb, etc.

Le processus de relevé se divise en trois phases : l'esquisse, la mesure et le dessin. La phase d'esquisse consiste à explorer et se familiariser avec l'environnement. Les proportions initiales du bâtiment sont esquissées en utilisant les éléments disponibles. Ensuite, les mesures sont prises à l'aide des outils mentionnés ci-dessus, en utilisant la triangulation comme méthode de mesure. En effet, les triangles peuvent être définis en connaissant uniquement leurs côtés, ce qui permet de mesurer différents types de formes géométriques (à l'exception des courbes). De nos jours, les mesures sont

également prises à l'aide de tachymètres [(Dubois et al., 2017 : 1)]. Les opérateurs doivent viser des repères préalablement définis et les utiliser comme référence. Le plan, la coupe ou l'esquisse générale, qui constitue l'élément clé de l'intervention, est ensuite transféré sur papier à la main ou sur ordinateur.

Le relevé manuel présente l'avantage d'utiliser peu d'outils et d'être très flexible. Cependant, la précision de ces relevés dépend de l'opérateur, et les erreurs s'accumulent avec des conséquences potentielles dans le futur. Par conséquent, de nouvelles techniques de mesure doivent être utilisées comme contrôle afin de réduire ces erreurs. Cette approche manuelle peut être chronophage et nécessiter beaucoup de travail, ce qui motive l'utilisation de nouvelles technologies pour faciliter le processus.

### **1.2.2.2. Relevés automatisés**

Dans divers domaines tels que l'art, la réalité augmentée, l'archéologie et le patrimoine culturel, il est insuffisant de se fier uniquement aux images en deux dimensions. Pour répondre à ces exigences spécifiques, il est nécessaire d'acquérir des données de forme tridimensionnelle en utilisant des scans 3D de l'objet à mesurer, permettant ainsi d'obtenir une vue complète de l'objet.

Il est important de souligner que les nouvelles technologies offrent une qualité supérieure par rapport aux méthodes traditionnelles, mais elles ne remplacent pas complètement ces dernières. Il n'y a pas d'opposition entre ces différentes techniques, car chacune est utilisée en fonction des besoins spécifiques de chaque cas. Chaque situation est unique, de même que la question de la fiabilité dans le contexte de la technologie de capture numérique.

De nos jours, les techniques de numérisation géométrique modernes jouent un rôle essentiel dans les enquêtes sur les bâtiments, en offrant la possibilité de mesurer avec précision des millions de points géométriques sur les surfaces des bâtiments, ce qui permet de créer un nuage de points détaillé. Il serait pratiquement impossible d'obtenir de tels résultats en utilisant uniquement des méthodes traditionnelles d'enquête, telles que la station totale, qui était autrefois l'instrument privilégié pour les relevés (Dubois et al., 2017).

Il existe aujourd'hui de nombreux outils disponibles pour la numérisation tridimensionnelle des objets, mais le scanner laser 3D est l'outil le plus couramment utilisé. Il permet d'obtenir des mesures précises en générant des nuages de points 3D à partir des surfaces des objets scannés.

### **1.2.3. Phase 2 : Traitement des données de la reconstruction 3D**

Après avoir collecté les données, la première étape du processus de modélisation, une série d'opérations est entreprise pour traiter le nuage de points obtenu. Cela permet de générer une représentation numérique des éléments numérisés. Il est important de noter que plus la densité du nuage de points est élevée, plus le travail à effectuer est important. Les enregistrements et les fichiers générés sont de grande taille et nécessitent un traitement de données plus substantiel. Comme nous le montre la figure .9, l'acheminement de l'information 3D, se fait en trois étapes : A: scanner laser - B :reconstruction photogrammétrique -C :calage de nuages -D :georeferencement, et les dessins en traits peuvent être réalisés en n'importe quelle forme de modelé 3d ou a partir des images

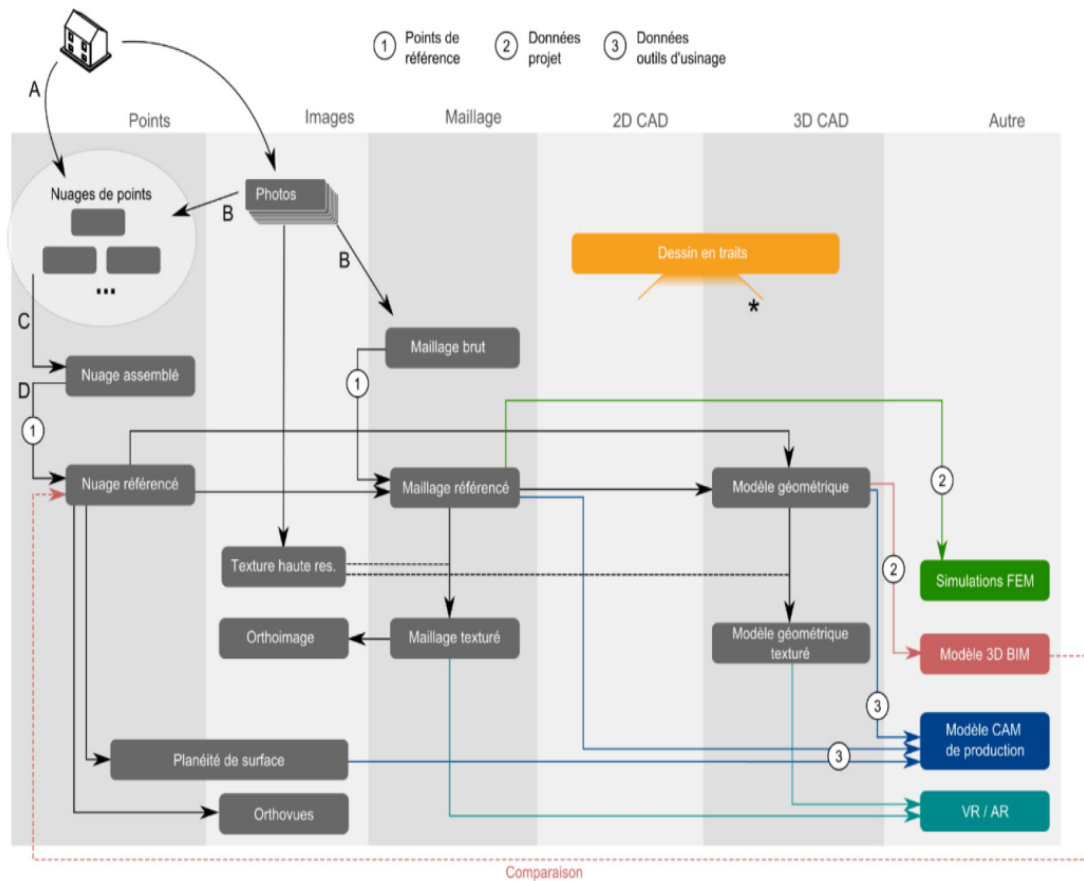


Fig. 1.9. Cheminement de l'information 3D

### 1.2.3.1 Intégration de nuages de points

Le traitement des données débute par l'importation des fichiers bruts. Après avoir collecté les données, le résultat obtenu est un nuage de points qui représente une reproduction complète de l'objet. Une fois la qualité de la numérisation confirmée, la première étape est la consolidation du nuage de points. Cette étape comprend l'orientation des données par rapport au capteur, ainsi que le positionnement des sous-vues pendant la numérisation pour ajuster le système de coordonnées cartésien global (x, y, z). La consolidation englobe deux opérations : la visualisation et la fusion. La fusion des différents nuages de points peut être réalisée manuellement ou automatiquement. Des marqueurs sont parfois placés sur les éléments avant la numérisation pour faciliter la fusion initiale du nuage de points par le logiciel. Cependant, cela ne dispense pas l'opérateur de vérifier correctement l'orientation des nuages.

Dans les deux cas, si l'on continue à enregistrer le nuage de points, un fichier est créé contenant les points de vue positionnés les uns par rapport aux autres. Cela permet de générer une visualisation de l'objet et de vérifier la qualité de l'enregistrement. Les nuages de points peuvent ensuite être fusionnés en un seul fichier. À ce stade, l'objet numérisé est toujours représenté par un nuage de points dont les coordonnées sont référencées le long des axes X, Y et Z. Ce nuage de points présente un ensemble de points désorganisé, une densité inégale et du bruit.

### 1.2.3.2 Segmentation

La prochaine étape consiste à traiter les nuages de points. Un nettoyage initial est effectué lors

de l'intégration du nuage de points afin de supprimer les éléments qui ne sont pas spécifiques à l'objet numérisé. Cette étape permet de réduire la taille du fichier et facilite les manipulations ultérieures. Si vous savez que votre relevé comporte plus de 50 000 000 de points, il est essentiel de procéder à une segmentation. La segmentation consiste à diviser le nuage de points en sous-ensembles regroupés dans des structures hiérarchiques. Après cette opération, le volume du fichier reste important mais il peut être exporté avec différentes données géométriques liées à l'assemblage créé. Il est également possible d'appliquer un maillage au fichier. Tout comme lors de l'étape d'intégration, vous pouvez préparer le fichier résultant de différentes manières, notamment en l'exportant sous forme de modèle de nuage de points ou en le représentant tel quel en tant qu'objet.

### **1.2.3.3 Maillage / modelage**

Le processus de maillage, également connu sous le nom de pavage ou polygonisation, consiste à convertir un nuage de points en une structure de plans. Plusieurs étapes sont nécessaires pour construire un maillage complet. Tout d'abord, le nuage de points est prétraité afin de ne conserver que les données essentielles dans le fichier. Ce prétraitement peut être effectué manuellement ou automatiquement. Ensuite, le maillage est principalement créé en connectant les sommets des points avec des polygones, généralement des triangles. Les dimensions des polygones peuvent être ajustées par l'opérateur pour obtenir la précision souhaitée dans la modélisation des objets.

Cependant, plus le maillage est dense, plus le modèle 3D sera détaillé, ce qui implique un volume de données plus important. Le rendu du modèle 3D à l'écran est effectué à l'aide d'un algorithme appelé shader. Celui-ci permet de représenter les surfaces comme étant courbes plutôt que planes, en tenant compte des variations de réflexion de la lumière. Cependant, cette représentation par des triangles peut masquer certaines informations et donner l'impression de courbes lisses, même si les données réelles sont discrètes. Il est également possible d'ajouter des textures au maillage, c'est-à-dire des images 2D projetées sur l'objet 3D. Les textures peuvent être appliquées pour réaliser des effets réalistes, comme la projection d'une texture en bois sur un modèle de tête. Pour cela, l'image doit être aplatie pour s'adapter correctement au modèle 3D lors de la projection. Cependant, l'utilisation de textures n'est pas obligatoire si le modèle est destiné à des fins de production.

Le La troisième étape du processus de maillage consiste à optimiser la structure du maillage en effectuant diverses opérations de post-traitement. Cela peut inclure la suppression d'interférences lors de la mesure ou de la création d'un réseau, ainsi que la fermeture manuelle ou automatique des trous dans le maillage. Les données générées par le maillage sont représentées par un ensemble de points, ce qui permet d'optimiser le maillage en fonction de la destination finale. Par exemple, pour la création de modèles numériques, il est possible de simplifier la forme de l'objet, tandis que pour une production numérique fidèle à l'original, il est important de minimiser la perte d'informations et de précision lors de l'optimisation du maillage.

Tout le travail effectué sur le maillage est de nature mathématique, et la sélection des opérations à effectuer peut dépendre de la puissance de l'ordinateur utilisé, notamment de la quantité de RAM disponible et de la nécessité d'une carte graphique moderne pour les générations les plus récentes. Certains logiciels, tels que Photoscan utilisé en photogrammétrie, tirent parti de manière intensive de la carte graphique pour ces opérations (Fig. 1.10).

#### 1.2.3.4. Exportation des données

Après toutes ces opérations, il est possible de demander au logiciel de sauvegarder les fichiers résultants. Il existe deux types de modèles : "étanches" et "non étanches". Les modèles étanches sont fermés, ce qui signifie qu'ils ne contiennent pas de trous ou de points non scannés, et ils peuvent être modifiés. Les modèles non étanches sont ouverts, ce qui signifie qu'ils peuvent être modifiés à l'aide d'autres logiciels tels que Autodesk Meshmixer. [(Carrieri, Formation OBS, 2019)]. La procédure d'exportation permet de créer une représentation numérique de l'objet, en vue de sa reproduction selon différents modes de fabrication. C'est la dernière étape de tout le processus de numérisation.

Les données peuvent être exportées vers un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) ou un modéleur 3D pour créer un modèle 3D. Voici quelques-uns des formats couramment utilisés pour exporter un nuage de points ou un maillage 3D : **wavefront (.obj)**, après toutes ces opérations, demandez au logiciel de vider les fichiers exploitables. - **Motif étanche**

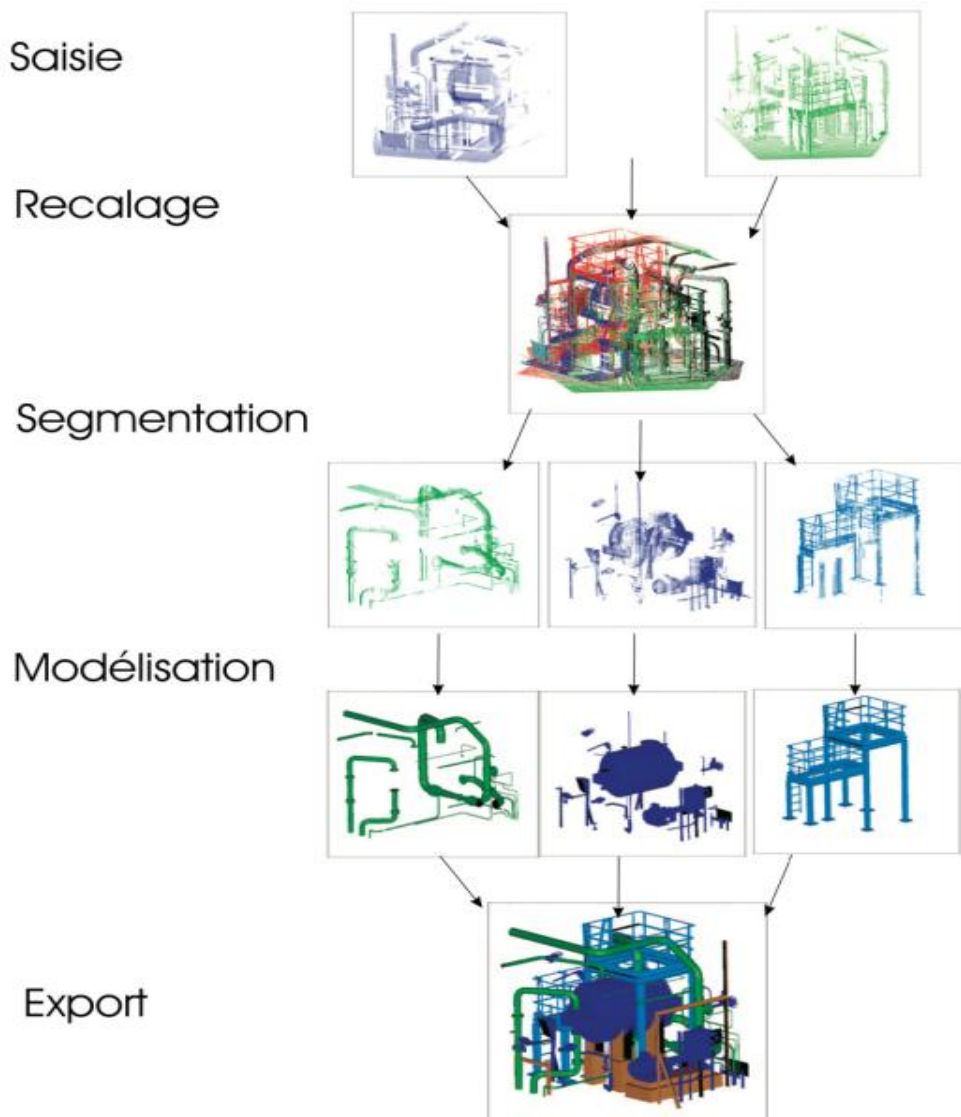


Fig. 1.10 Étapes de la modélisation «tel que construit »

## *CHAPITRE 2*

# *Scanners 3D et Logiciels utilisés dans le domaine de La rétro- conception*

## **2.1. Scanners 3D pour la rétro-ingénierie**

Il existe diverses méthodes de mesure pour effectuer la numérisation 3D des objets. Ces méthodes comprennent l'utilisation de scanners laser, de scanners optiques, de scanners à lumière structurée, de machines de mesure tridimensionnelle (MMT) et de scanners industriels. Les informations de mesure brutes sont généralement recueillies sous forme de nuage de points, qui doit ensuite être converti en un format plus pratique, tel qu'un maillage ou un modèle CAO. Pour réaliser cette conversion, les équipements de numérisation sont souvent utilisés en conjonction avec des logiciels de rétro-ingénierie.

Dans notre étude, nous avons utilisé un scanner à lumière structurée. Cette technologie de balayage offre une rapidité et une précision élevées. Les scanners à lumière structurée fonctionnent en projetant des motifs lumineux sur l'objet à numériser. La caméra du scanner enregistre les déformations de ces motifs sur l'objet. Ensuite, les distances entre les différents points sont calculées pour créer un modèle 3D qui peut être modifié ou directement imprimé sur une imprimante 3D. Pour numériser le pignon du démarreur du moteur General Electric, l'ingénieure de l'entreprise SAIEG a utilisé le modèle STEINBICHLER COMET L3D 8MP lors du processus de numérisation.

### **2.1.1. Principe de fonctionnement**

Un scanner 3D mesure typiquement les positions d'un échantillon de points sur la surface d'un objet dans son système de coordonnées, créant ainsi un nuage de points à partir duquel sa forme peut être déduite. Ce processus est connu sous le nom de reconstruction 3D. En analysant la couleur de chaque point, il est également possible de reconstituer la couleur de la surface. On peut établir une analogie entre une caméra et un scanner 3D, car les deux ont un champ de vision et utilisent des technologies optiques. Cependant, ils ne peuvent pas voir ce qui est caché. La caméra capture la couleur de la surface dans son champ de vision, tandis que le scanner 3D mesure la position des points de la surface par rapport à l'échantillon. L'image générée est basée sur un ensemble de données qui contient les coordonnées de chaque point scanné par rapport au scanner 3D. En utilisant un système de coordonnées sphériques, avec le scanner comme origine, chaque point peut être identifié par ses coordonnées  $(r, \varphi, \theta)$ . La valeur  $r$  représente la distance entre le scanner et le point, tandis que  $\varphi$  et  $\theta$  représentent les angles formés par une ligne allant de l'origine du scanner au point analysé et deux plans (un plan horizontal et un plan vertical) passant par l'origine. Ces coordonnées sphériques permettent d'identifier chaque point de l'espace par rapport au scanner, ce qui est essentiel pour les travaux préliminaires et la modélisation numérique de l'image 3D de l'objet. **[[Fausto Bernardini, Holly E. Rushmeier]**

### **2.1.2 Scanner par triangulation lumière structurée**

Les scanners 3D à lumière structurée utilisent la projection d'un motif lumineux sur l'objet pour observer sa déformation. Ce motif peut être unidimensionnel ou bidimensionnel. Par exemple, prenons le cas d'un motif unidimensionnel sous la forme d'une ligne. Cette ligne est projetée sur l'objet à l'aide d'un vidéoprojecteur LCD ou laser. Une caméra, légèrement décalée par rapport au projecteur, enregistre les éventuelles déformations de la ligne. Une technique similaire à la triangulation est alors utilisée pour calculer la distance et, par conséquent, la position des points représentant la ligne. Le motif balaye le champ de vision afin de recueillir, bande par bande, les informations relatives aux distances.

Considérant maintenant le cas d'un motif de grille ou de bande. Une caméra est utilisée pour enregistrer les déformations, tandis qu'un programme informatique complexe est utilisé pour calculer les distances entre les points composant le motif. La complexité réside dans l'ambiguïté qui peut se présenter. Prenons l'exemple d'un groupe de bandes verticales qui balayent horizontalement un objet. Dans le scénario le plus simple, l'analyse repose sur l'hypothèse que la séquence des bandes visibles de gauche à droite correspond à celle de l'image laser projetée. Ainsi, l'image de la bande la plus à gauche est considérée comme la première dans la projection laser, celle suivante est la deuxième, et ainsi de suite. Cependant, lorsqu'il s'agit de cibles complexes comportant des trous, des occlusions ou des changements rapides de profondeur, l'ordre des bandes peut ne plus être vérifié. Certaines bandes peuvent être masquées ou apparaître dans un ordre différent, ce qui entraîne une ambiguïté des bandes laser. Ce problème spécifique a récemment été résolu grâce à une avancée technique appelée "Multistriple laser Triangulation (MLT)" (triangulation laser multibande). La numérisation 3D à lumière structurée est un domaine de recherche actif qui génère de nombreuses publications chaque année.

La principale force des scanners 3D à lumière structurée réside dans leur rapidité. Au lieu de numériser un point à la fois, ils peuvent numériser l'ensemble du champ de vision simultanément. Cela limite ou élimine les problèmes de distorsion liés aux mouvements. Des systèmes existants sont capables de numériser en temps réel des objets en mouvement (Fig. 2.1). Récemment, Song Zhang et Peisen Huang de l'Université de Stony Brook ont développé un scanner à balayage rapide utilisant la projection d'une frange numérique et une technique de modulation de phase (une autre méthode de lumière structurée). Ce système est capable de capturer, reconstruire et restituer les détails d'objets se déformant dans le temps, tels que les expressions faciales, à une fréquence de 40 images par seconde. Prenons maintenant l'exemple d'un motif en forme de grille ou de bande. **[(en) Song Zhang, Peisen Huang]**

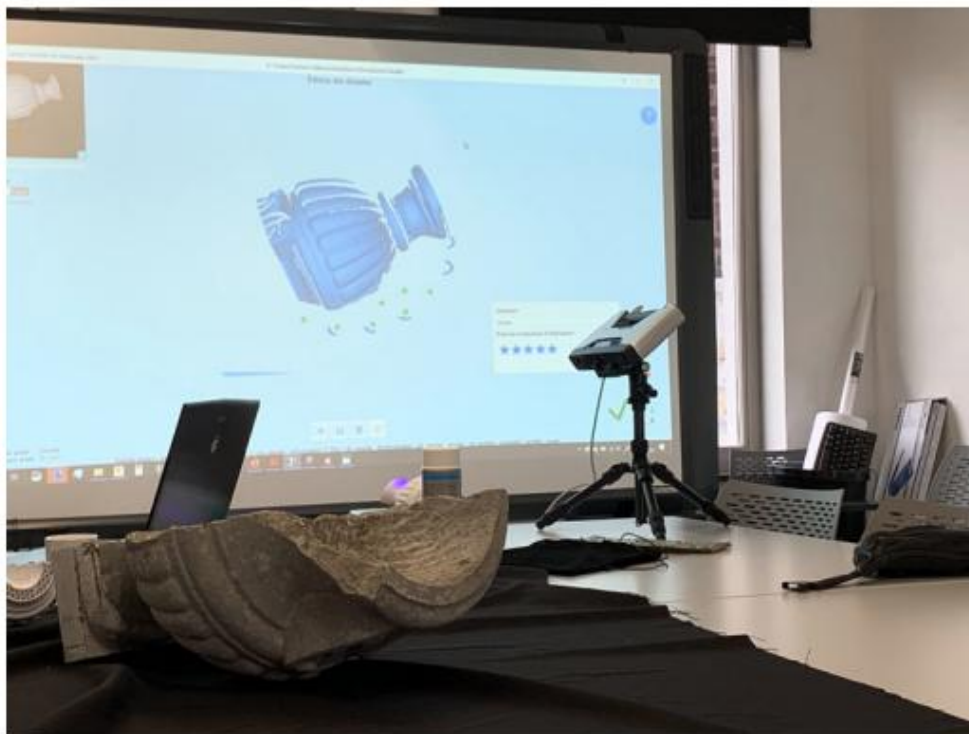


Fig. 2.1. - Scanner par triangulation lumière structurée

### **2.1.3 STEINBICHLER COMET L3D 8MP**

Le Steinbichler Comet L3D 8MP est un scanner 3D professionnel fabriqué par la société allemande Steinbichler. Ce produit est disponible en quatre versions différentes avec des résolutions allant de 1MP à 8MP. Compact et performant, ce scanner 3D est doté d'un capteur de haute qualité qui permet une acquisition de données 3D efficace, rapide et précise. Le Steinbichler Comet L3D 8MP utilise la technologie de numérisation 3D à lumière structurée basée sur des LED bleues (Fig. 2.2). Avec son capteur de 8 mégapixels, il offre une solution idéale pour les professionnels qui recherchent des performances maximales. Ce scanner 3D professionnel est recommandé pour diverses applications telles que le contrôle qualité, la fabrication de moules et d'outils, l'impression 3D, la rétro-ingénierie, ainsi que la conservation archéologique et patrimoniale.

[\[https://www.aniwaa.fr/produit/scanners-3d/steinbichler-comet-l3d-8m/\]](https://www.aniwaa.fr/produit/scanners-3d/steinbichler-comet-l3d-8m/)



Fig. 2.2 – STEINBICHLER COMET L3D 8MP

### **2.1.4 Autres types de scanners utilisés dans la rétro-conception**

De nombreux Scanners qui permettent la rétro-conception existent. On cite dans cette section quelques-uns :

#### **2.1.4.1 Scanner laser**

Il est important de comprendre que le balayage laser repose sur le principe du LiDAR (détection et télémétrie par laser). Le LiDAR utilise une technique de télédétection laser qui sera expliquée plus en détail par la suite. Lors d'un balayage laser, un LiDAR émet des impulsions lumineuses (faisceaux laser) en direction de l'objet à mesurer. Après avoir atteint la surface de l'objet, le faisceau retourne à la source lumineuse. Étant donné que nous connaissons la vitesse de la lumière, qui est d'environ 299 800 km/s, nous pouvons mesurer la distance de cette manière (Fig. 2.3).

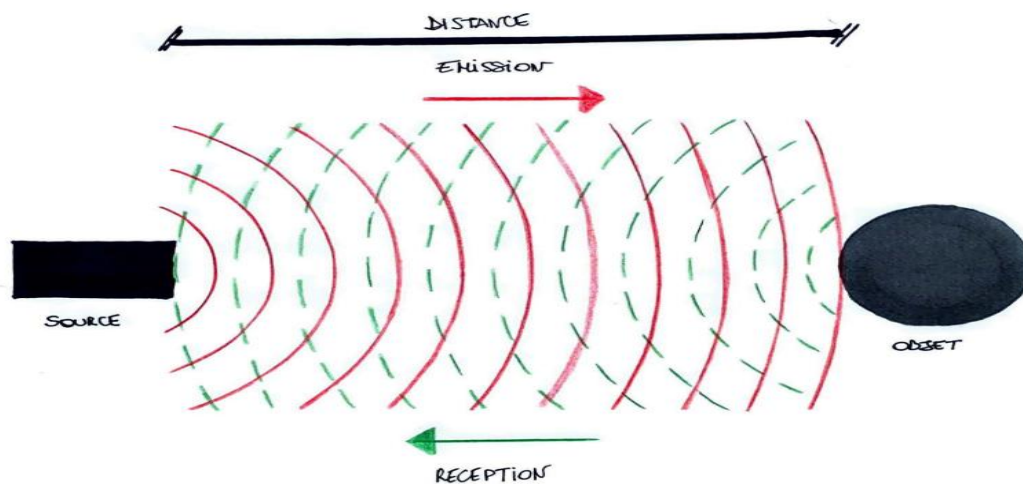


Fig. 2.3 Principe du LiDAR

Grâce aux avancées technologiques actuelles, il est possible de transmettre un grand nombre de faisceaux et de collecter des données rapidement. Chaque point enregistré peut être référencé avec une précision allant jusqu'à 1 mm. Il existe deux techniques courantes utilisant des lasers pour réaliser une numérisation laser : l'ablation laser et la triangulation. La télémétrie laser mesure le temps nécessaire à un faisceau de lumière pour parcourir la distance entre la source lumineuse et l'objet mesuré. La triangulation fonctionne en utilisant un faisceau laser réfléchi par un miroir mobile. La position de ce point réfléchi sur l'objet est enregistrée par une caméra. Les données collectées forment un "nuage de points" où chaque point est référencé dans l'espace tridimensionnel par ses coordonnées X, Y et Z [(Fuchs et al., 2004)]. Le scanner à temps de vol (TOF) ou le scanner laser pulsé est une technologie qui combine deux méthodes de numérisation 3D : le balayage laser impulsionnel et le balayage par déphasage. Les deux méthodes sont basées sur les principes mentionnés précédemment, c'est-à-dire le calcul du temps entre l'émission du laser et son retour vers le capteur après avoir touché la surface [Héno et al., 2014].. Cependant, en plus de moduler l'amplitude du faisceau laser utilisé pour la numérisation 3D, les méthodes de balayage par déphasage ou "à onde continue" modulent également sa phase. Ainsi, lorsqu'un appareil projette un faisceau laser, celui-ci revient par réflexion, mais sous un angle différent de celui auquel il a été émis. Le capteur mesure donc la distance en analysant le déphasage entre les faisceaux émis et réfléchis (Fig. 2.4). Les scanners laser pulsés sont souvent utilisés pour numériser des bâtiments extérieurs en raison de leur grande portée, tandis que les scanners par déphasage sont plus adaptés à la numérisation en intérieur



Fig. 2.4. Scanner à impulsion laser

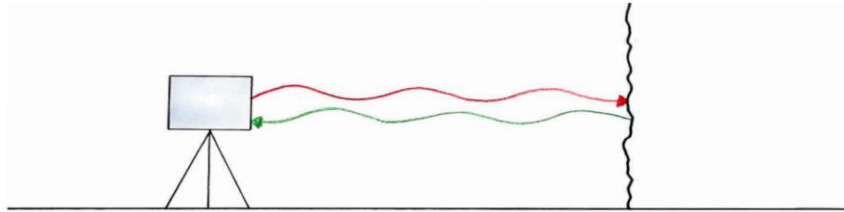


Fig. 2.5. Scanner à décalage de phase

Les scanners laser à temps de vol offrent un avantage majeur en termes de capacité à numériser des objets et des environnements en 3D de grande taille. Leur précision est mesurée en millimètres, voire mieux, en fonction du matériau utilisé (Fig. 2.6). Cependant, ces scanners sont généralement très coûteux, atteignant parfois 100 000 € [(Billen, 2015)]. Toutefois, en raison d'une demande croissante, leur prix devient plus abordable pendant un certain temps, comme le montre l'intégration de Lidar dans les véhicules Tesla. Néanmoins, un marché réel existe déjà pour les mini scanners Lidar destinés aux particuliers. Pour seulement 300 euros, il est possible d'acquérir un petit Lidar capable de générer un nuage de points exploitable [(Carrieri, Formation OBS, 2019)].

<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00260671/document>



Fig. 2.6 Scanner Laser 360° RPLIDAR A2M8

Le volume de données est colossal et leur traitement demande une personne ayant une certaine expérience avec ce type d'informations. La reconstruction du maillage et la connexion entre différents plans peuvent être complexes, mais la précision obtenue dépasse largement celle des systèmes de triangulation portables.

#### **2.1.4.2. Scanner par triangulation optique**

Le terme "triangulation" est utilisé en référence au triangle formé par le spot laser, la caméra utilisée pour localiser le faisceau ou le point sur l'objet créé par le faisceau laser, et l'émetteur laser. Les dimensions de ce triangle sont déterminées par ces trois éléments (Fig. 2.7).

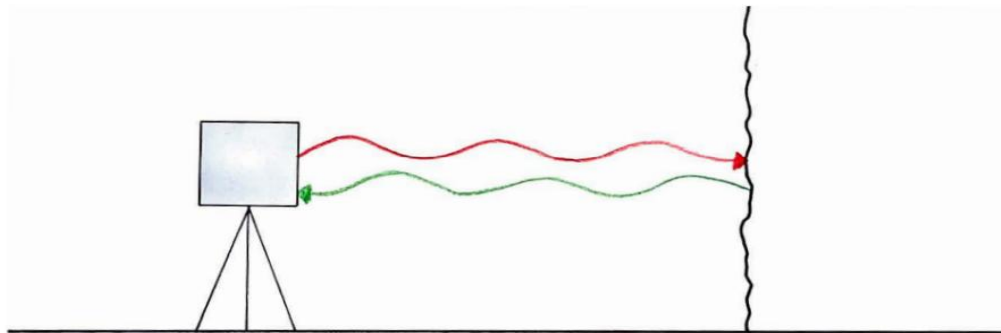


Fig.2.7 Scanner par triangulation optique

Le processus débute par l'émission d'un faisceau laser à partir d'un scanner 3D, de manière similaire à un balayage laser à temps de vol. Ce faisceau laser est ensuite réfléchi par la surface de l'objet balayé, ce qui provoque une déviation de sa trajectoire. Un capteur détecte cette déviation et mesure également la distance entre le scanner 3D et la surface de l'objet. En recueillant un grand nombre de points sur la surface de l'objet, le capteur est capable de déduire avec précision la forme de la surface. Ce type de scanner est particulièrement efficace pour les petits objets. Cependant, en raison de sa portée limitée, il n'est pas adapté à la numérisation de grands bâtiments.

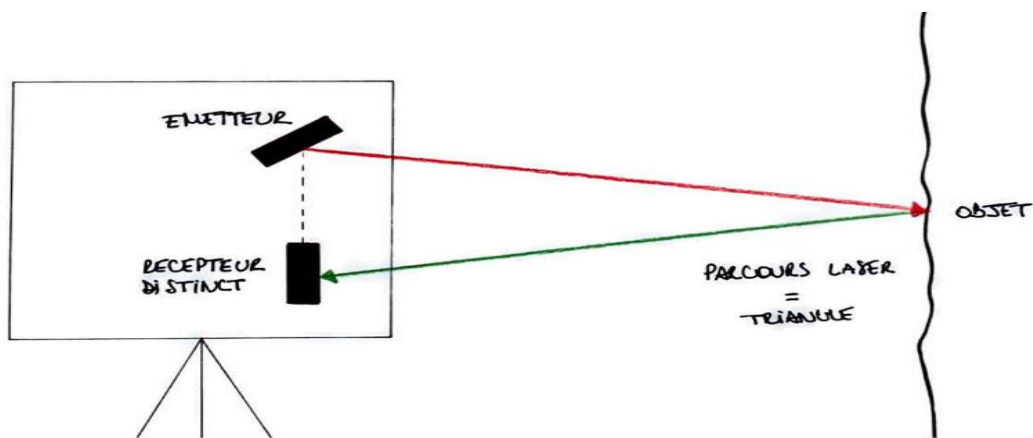


Fig. 2.8 - Système de triangulation

### 2.1.4.3 Scanner avec contact

La numérisation 3D par contact implique que le scanner entre en contact avec la surface à numériser. Cette méthode utilise des capteurs de contact, également appelés sondes, qui sont attachés au scanner pour collecter des informations sur la surface et créer un modèle 3D. Comme pour toutes les numérisations 3D, sa caractéristique principale est sa grande précision (Fig. 2.9). Cependant, la numérisation 3D par contact offre la possibilité de numériser des surfaces réfléchissantes ou transparentes, ce qui n'est pas réalisable avec les scanners laser. Malheureusement, cette technologie est rarement utilisée dans les domaines de l'archéologie et de la restauration. Cela est dû au fait que cette méthode, qui implique un contact direct avec les objets numérisés, peut entraîner des altérations sur des objets de valeur historique ou intrinsèque. De plus, la numérisation 3D par contact est relativement lente et n'est pas recommandée pour la numérisation de formes organiques et

complexes. Malgré ces limitations, elle est très largement utilisée dans l'industrie, notamment pour le contrôle qualité des pièces usinées.



Fig. 2.9. Scanner avec contact

#### 2.1.4.4. Les machines à mesurer tridimensionnelles (MMT)

Une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) est utilisée pour effectuer des mesures dimensionnelles. Elle permet d'obtenir les coordonnées des points mesurés (touchés) sur une pièce mécanique. On utilise parfois le terme de "mesure par coordonnées" pour décrire cette méthode de mesure. Lorsqu'une mesure est effectuée, la valeur connue est comparée numériquement à la valeur mesurée. L'enregistrement des coordonnées permet de vérifier la précision dimensionnelle en mettant en évidence les écarts par rapport aux valeurs nominales. Les mesures de grandeurs géométriques peuvent être effectuées à l'aide d'instruments de mesure simples tels que des pieds à coulisse et des micromètres, ainsi qu'à l'aide d'appareils plus complexes tels que les MMT (Fig. 2.10).

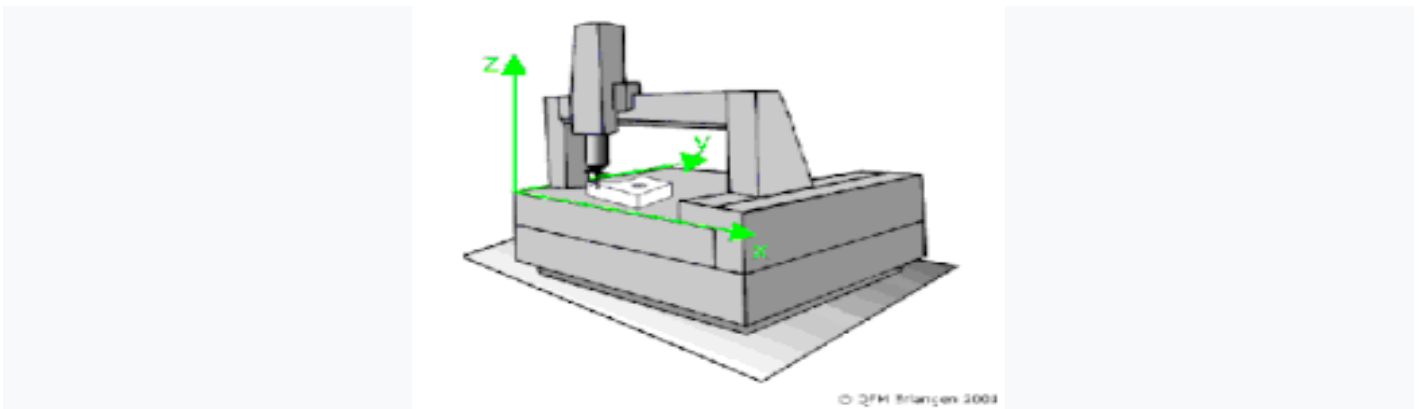


Fig. 2.10. MMT à portique

Un MMT se compose de plusieurs parties (Fig. 2.11) :

- . Base de support (la partie qui fixe l'objet à mesurer, communément appelée «marbre») Veuillez noter que la base de support ne doit pas nécessairement être géométriquement parfaite.
- Trois liens coulissants appelés Axis Guides (X, Y, Z), règles graduées (optiques ou électroniques) pour vous aider à savoir exactement où se trouve chaque axe.
- Contrôleur numérique (commande le mouvement de la machine, le contrôle de l'entraînement des axes, le traitement du signal de la tête de mesure, etc.)
- Système de capteur (tactile ou optique)



Fig. 2.11 Machine à mesurer tridimensionnelle.

Obtenir simplement les coordonnées des différents points sur la pièce ne fournit pas beaucoup d'informations utiles. C'est pourquoi la machine à mesurer tridimensionnelle (CMM) est connectée à un ordinateur équipé d'un logiciel d'interprétation des coordonnées. Ce type de logiciel permet de calculer la géométrie idéale des points détectés à la surface de la pièce à mesurer, ainsi que de rapidement évaluer les erreurs de tolérance géométrique telles que la forme, la position, le parallélisme, la coaxialité, etc.

#### 2.1.4.5. *Photogrammétrie*

Il s'agit d'une méthode de reconstruction photogrammétrique automatique qui repose sur l'utilisation de plusieurs images. En réalité, les modèles 3D sont recréés à partir d'informations extraites des photographies prises sous différents angles. Le logiciel compare les pixels des photos les uns aux autres et les replace dans un espace 3D (Fig. 2.12). La numérisation 3D des objets repose également sur la détection des pixels communs à différentes images. [(Dubois et al., 2017 : 14).]

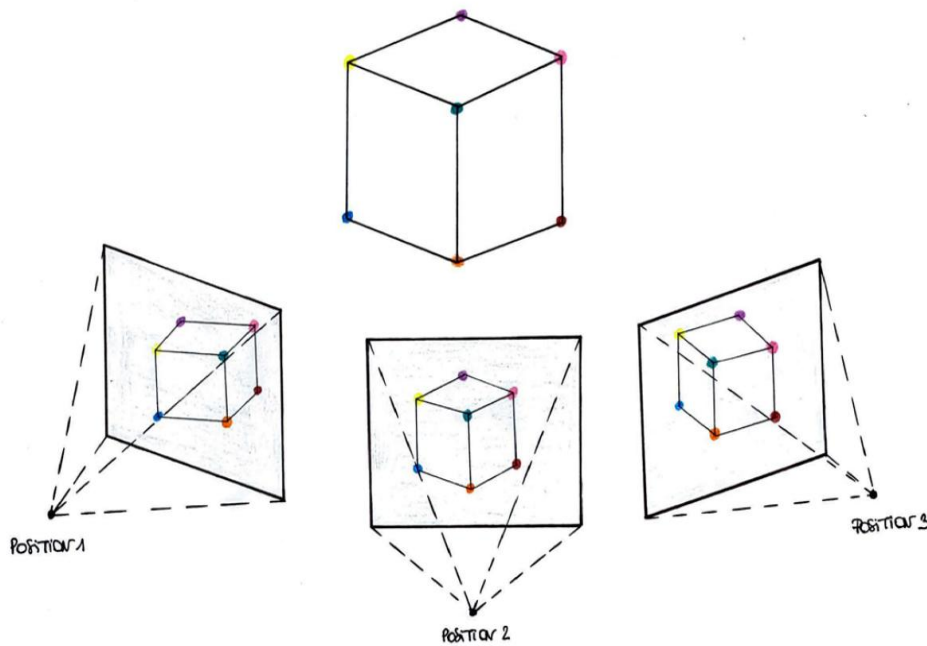


Fig. 2.12. Reconstruction photogrammétrique automatique sur base de multiples images

La photogrammétrie présente des avantages significatifs en termes de précision et de rapidité d'acquisition, car elle repose sur l'utilisation de photographies. Elle peut être appliquée à divers types d'objets et l'équipement nécessaire est généralement plus abordable que celui utilisé pour la numérisation LiDAR 3D [(Billen, 2015)]. De plus, la photogrammétrie peut être intégrée dans des mobil-homes. Cependant, lors de la phase de calcul pour générer la surface 3D, le nombre et la qualité des photos sont des paramètres qui peuvent augmenter le temps de calcul requis. Il est nécessaire d'utiliser un ordinateur puissant pour ces calculs. Un autre inconvénient est que les objets numérisés peuvent être à une échelle incorrecte, ce qui nécessite un ajustement de l'image. Parfois, il est préférable de réduire la densité du maillage lorsqu'il est nécessaire de retraiter l'objet ultérieurement.

## 2.2. Logiciels utilisés dans la rétro ingénierie

Il existe de nombreux logiciels qui permettent la rétro-ingénierie. Nous citez-en quelques-uns dans cette section :

### 2.2.1 Geomagic™

Ce logiciel est l'un des plus puissants en termes de rétro-conception (Lin & He, 2015). Il offre la possibilité de modifier le maillage, le nuage de points et les surfaces construites. De plus, il permet l'extraction de surfaces orientées et la création de surfaces CAO. Le logiciel est capable de reconnaître automatiquement différents types de surfaces tels que les cylindres, les plans, les sphères et les cônes, ainsi que les surfaces basées sur des contours tels que les extrusions et les révolutions. Des opérations telles que l'enlèvement de matière, les extrusions et les révolutions peuvent être effectuées en utilisant les contours détectés comme esquisses. Des pièces complexes comme les pales de turbines peuvent être modélisées en volume. Les contours d'esquisse sont automatiquement extraits, ce qui permet au concepteur de redessiner une nouvelle esquisse par-dessus et de générer des fonctions telles que la révolution, le balayage, l'extrusion, etc.

Une autre option est Geomagic Design X, anciennement connu sous le nom de Rapidform™. Ce logiciel est spécifiquement conçu pour la rétro-conception de surfaces et de solides. Une nouvelle fonctionnalité a été ajoutée à la version 2014, appelée modélisation rapide. Elle permet d'accélérer la création d'entités grâce à la détection automatique et à la création de révolutions, de filets, d'extrusions, de balayages, etc. Il offre la possibilité de combiner le traitement des maillages issus de la numérisation avec des fonctionnalités de modélisation 3D solide paramétrique, permettant ainsi de créer des modèles solides modifiables (Fig. 2.13).



Fig. 2.13. : Exemple de rétroconception avec Geomagic™

### 2.2.2 Effisoft

Le logiciel propose une interface graphique interactive permettant d'inspecter et de segmenter les maillages de surface 3D (Attene et al., Une fois le maillage chargé, il est possible d'exécuter un algorithme de segmentation hiérarchique du maillage. L'objectif général de cet algorithme est de regrouper les faces du maillage de manière à ce que le regroupement puisse être approximé efficacement par l'une des primitives d'ajustement utilisées. La recombinaison se fait de manière hiérarchique et se déroule de manière ascendante. Cela signifie qu'au départ, chaque face du maillage représente un cluster individuel. À chaque itération, tous les groupes adjacents sont considérés par paires. Pour chaque paire, l'algorithme calcule les paramètres de la primitive géométrique qui se rapproche le plus des deux groupes de faces. L'itération se poursuit jusqu'à ce qu'un groupe unique représente la partie totale du maillage. Les différents groupes sont représentés par des couleurs distinctes pour faciliter leur visualisation (Fig. 2.14)

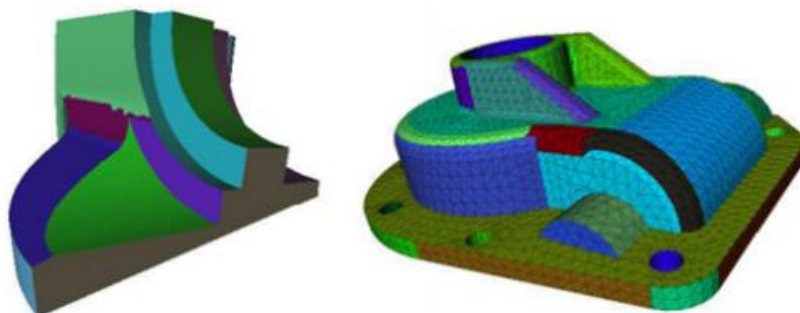


Fig. 2.14. Exemple de regroupement de modèles en régions

### 2.2.3 La société Nikon Metrology<sup>TM</sup>

La société a développé plusieurs logiciels, notamment Focus Inspection, Focus Scan, Focus Handheld et Focus Automation. Le module Focus Scan a pour objectif de définir la trajectoire du scanner, que ce soit en ligne ou hors ligne. En mode en ligne, le module gère les déplacements du scanner sur une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) et prétraite les données acquises en nuages de points bruts. En mode hors ligne, Focus Scan permet aux concepteurs de créer, modifier et tester des programmes de mesure basés sur des modèles CAO, en laissant la machine à mesurer tridimensionnelle effectuer toutes les opérations de mesure.

Focus Inspection est la référence pour l'inspection basée sur les nuages de points. Ce module permet d'acquérir des nuages de points et de les comparer avec les modèles CAO, ainsi que d'effectuer l'inspection des entités géométriques. Grâce à son interface utilisateur intuitive, le processus d'inspection peut être automatisé. Focus Inspection se base sur les informations des entités nominales du modèle CAO. Il permet l'extraction automatique des entités correspondantes à partir du nuage de points, puis compare les deux ensembles de données

### 2.2.4. DReshaper<sup>TM</sup>

Ce logiciel a été créé par Romer Hexagon Metrology, il a trouvé une solution de la reconstruction de surfaces 3D. Technodigit a développé ce logiciel. Cette solution est interfacée avec un bras de mesure transportable. Elle nous donne la main pour le traitement et la récupération de nuage de points (coloration automatique des nuages à l'import, nettoyage et réduction du bruit de mesure), et pour le maillage 2D et 3D, et pour la digitalisation, la rétroconception et la modélisation, reconstruire des surface, le contrôle 3D et l'inspection (alignement de la mesure avec le théorique, comparaison couleur et édition de rapport d'inspection). Ce logiciel offre de faire de la préparation pour reconstruire les surfaces comme l'extraction de formes géométriques (cylindre, plan), extracteur pour des lignes caractéristiques et les calculs des sections. La figure 2.15 montre un exemple d'une pièce industrielle rétro-conçue avec 3DReshaper

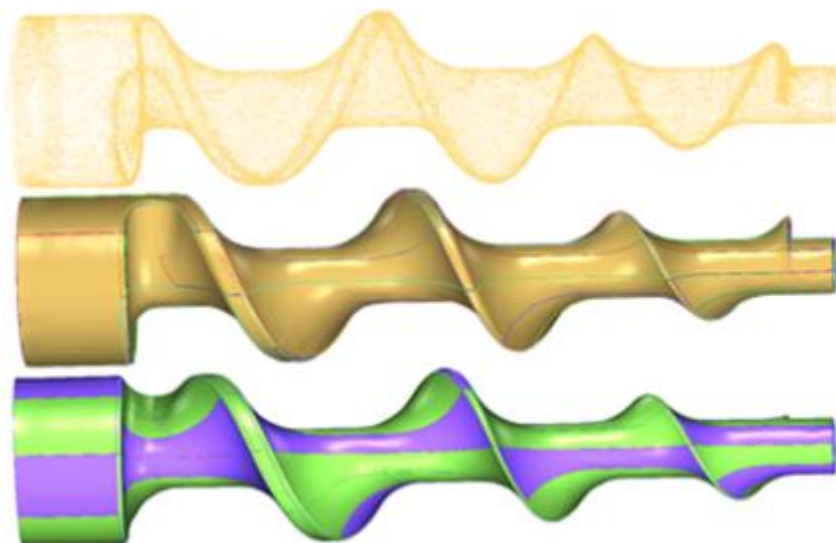


Fig. 2.15. Un exemple d'une pièce industrielle rétro-conçue avec 3DReshaper

### 2.2.5. CATIATM : Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée

Ce logiciel a été développé conjointement par Romer Hexagon Metrology et Technodigit, offrant une solution complète pour la reconstruction de surfaces 3D. Il est spécialement conçu pour être utilisé avec un bras de mesure portable. Avec ce logiciel, les utilisateurs peuvent traiter et exploiter les nuages de points, bénéficiant de fonctionnalités telles que la coloration automatique des nuages lors de leur importation, ainsi que des outils pour nettoyer et réduire le bruit de mesure (Fig. 2.16). En plus de la gestion des nuages de points, le logiciel propose des fonctionnalités avancées pour la création de maillages 2D et 3D, la digitalisation, la rétroconception, la modélisation et la reconstruction de surfaces. Il prend également en charge le contrôle 3D et l'inspection, en offrant des outils pour aligner les mesures avec les modèles théoriques, comparer les différences de couleur et générer des rapports d'inspection détaillés.

L'un des points forts de ce logiciel est sa capacité à préparer les surfaces pour la reconstruction, en permettant l'extraction de formes géométriques telles que des cylindres et des plans, ainsi que l'extraction de lignes caractéristiques et le calcul de sections. La figure 2.15 illustre un exemple concret de rétroconception d'une pièce industrielle réalisée avec l'aide de 3D Reshaper.

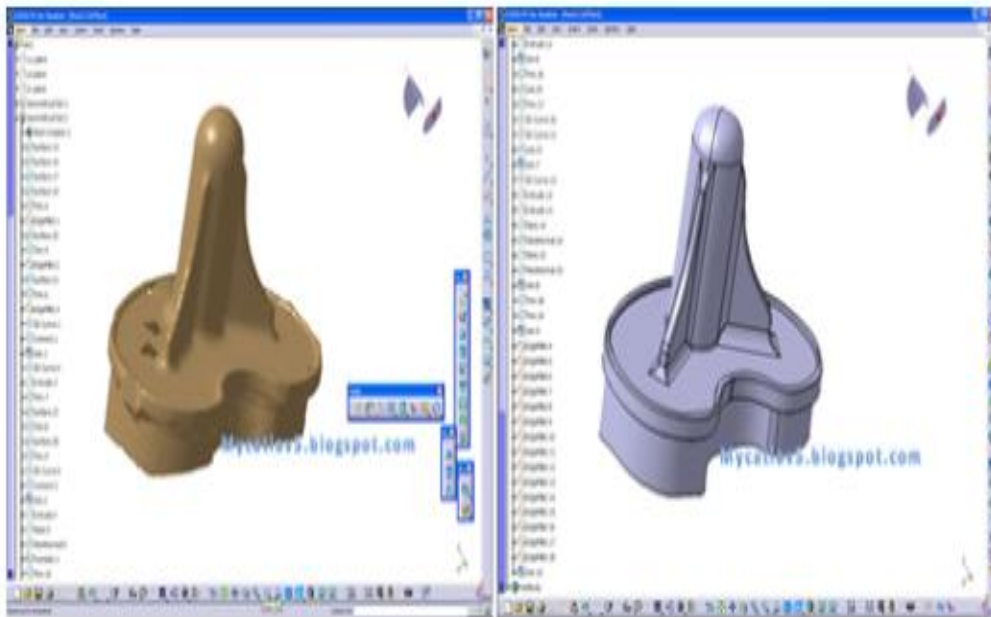


Fig. 2.16 Exemple de rétro conception avec CATIA™

## *CHAPITRE 3*

# *La rétro conception du pignon du démarreur de moteur général Electric*

## 3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire la rétro conception d'un pignon de démarreur du moteur général Electric, pour effectuer notre travail on doit passer par les étapes suivantes :

- A- Pour la 1ère étape on va utiliser le programme **GEOMAGIC DESIGN X** pour faire une génération numérique sur un fichier scan du pignon
- B- Pour la 2ème étape Nous allons créer un nouveau pignon similaire au pignon créé avec GEOMAGIC DESIGN X à l'aide du programme **GEAR TRAX**
- C- Etape 3 : nous allons faire l'assemblage du modèle du pignon de GEOMAGIC DESIGN X avec le modèle du pignon de GEAR TRAX pour faire une comparaison entre les deux corps, cette opération sera effectuée sur **SOLIDWORKS**
- D- Etape4 : la mise en plan du pignon créé, nous allons faire le dessin technique du pignon sur **SOLIDWORKS**

## 3.2 Définition des programmes

### 3.2.1 Geomagic design X

Geomagic est la marque de logiciels d'ingénierie professionnelle de 3D Systems. La marque a vu le jour lorsque Geomagic Inc., une société de logiciels basée à Morrisville, en Caroline du Nord, a été acquise par 3D Systems en février 2013 et combinée avec les autres entreprises de logiciels de cette société (à savoir Rapidform acquise par 3D Systems en octobre 2012 et Albre en juillet 2011). Geomagic a été fondée en 1997 par Ping Fu et Herbert Edelsbrunner. Geomagic Design est un logiciel de conception mécanique assistée par ordinateur, axé sur la conception de systèmes et d'assemblages mécaniques. Les logiciels Geomagic Freeform et Sculpt sont des progiciels de modélisation basés sur les voxels et sont fournis avec les appareils haptiques tactiles de 3D Systems qui s'interfacent avec le logiciel pour fournir un retour de force à l'utilisateur. **Geomagic Design X**, Design Direct, Studio et Wrap sont des produits logiciels qui offrent différents flux de travail pour créer des modèles 3D prêts à la fabrication, y compris la modélisation solide et le surfacage NURBS.

[["3D Systems Completes the Acquisition of Geomagic". 2013-02-27](#)]

### 3.2.2 Gear trax

GearTrax™ est un outil orienté / piloté par la propriété de programme de conception d'engrenages, fournit au concepteur un outil facile à utiliser pour créer des solides, GearTrax™ crée chaque modèle de pièce avec ses exigences spécifiques, tout comme un concepteur le ferait, mais prend quelques secondes plutôt que des heures ou des jours. Ce n'est pas l'intention de GearTrax pour remplacer votre système de CAO mais pour augmenter la Système de CAO avec une interface utilisateur qui permettra le concepteur d'engrenages pour visualiser avec précision les composants avant qu'ils ne soient modélisés dans la CAO Système. **[Data Sheet GearTrax (updated 1/23/2021)]**

### 3.2.3 Solidworks

SOLIDWORKS est un modeleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés.

[[« SOLIDWORKS 2022 SP1 Release Notes » \[archive\]](#), novembre 2021 (consulté le 2 /2/2022)]

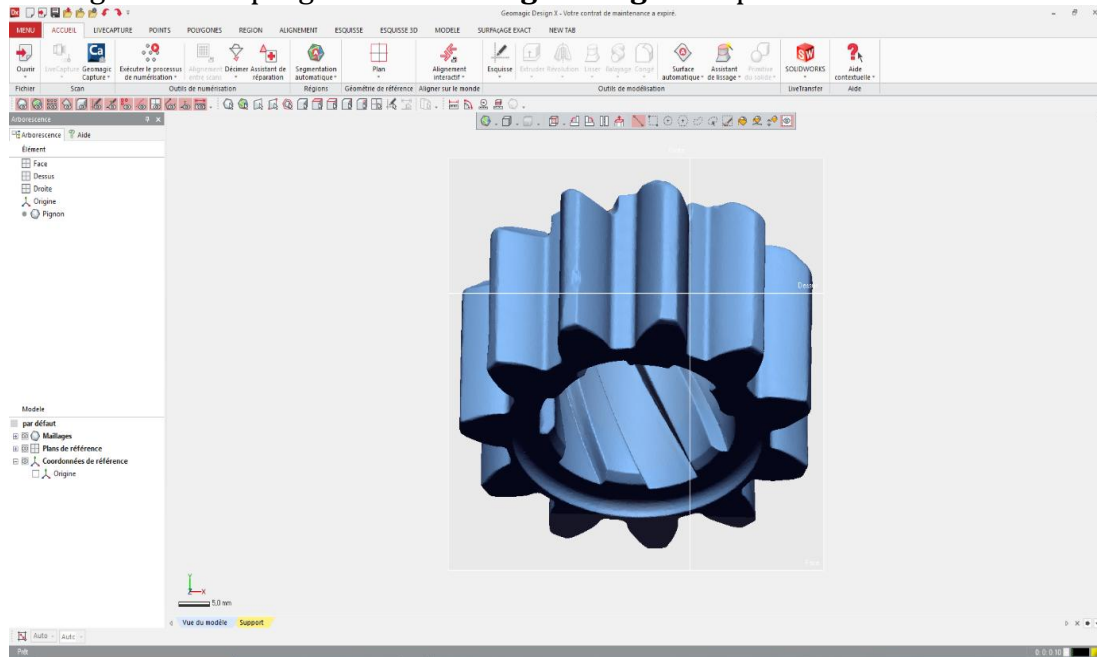
### 3.3 Etapes de la retro conception :

#### 3.3.1. ETAPE 1 : La génération numérique Sur GEOMAGIC DESIGN X :

Dans cette phase nous allons faire la génération numérique du fichier scan qu'on a réussi à partir de scannaire STEINBICHLER COMET L3D , la retro conception de pignon sera effectué sur le programme du geomagic design x à cause de sa puissance et ses fonctions variées qui sont tout mentionné sur les étapes dessous :

##### 1- Le fichier scan :

Après le démarrage de notre programme **Geomagic design X** importer le fichier scanné



**Fig 5.1** : le fichier scan

##### 2- La segmentation automatique :

Sur **L'accueil** on va sélectionner **segmentation automatique** pour identifier es surfaces de notre corps scannée

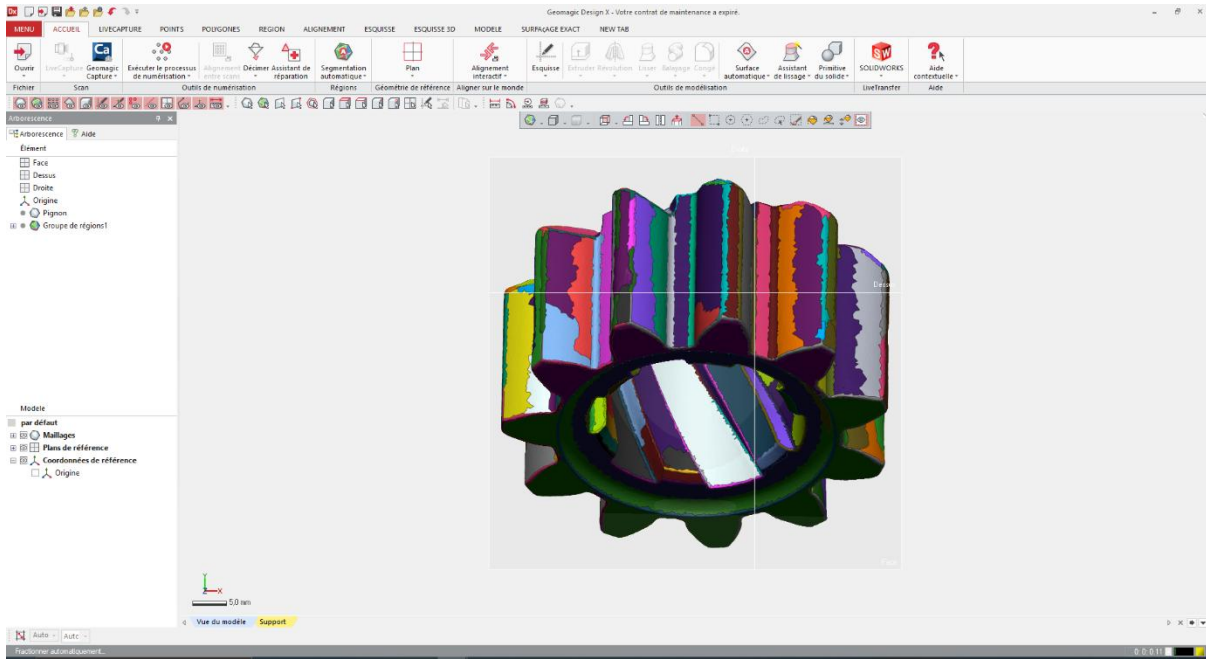


Fig 5.2 : segmentation automatique

### 3- La modification des plans pour fixer la pièce :

A- Créer un vecteur ou il est l'intersection du plan de face et plan de droite : sur le menu accueil on va sur la géométrie de référence et on va cliquer sur **vecteur** , pour les entités sélectionner le plan de face et le plan de droite, la méthode : intersecter 2 plans

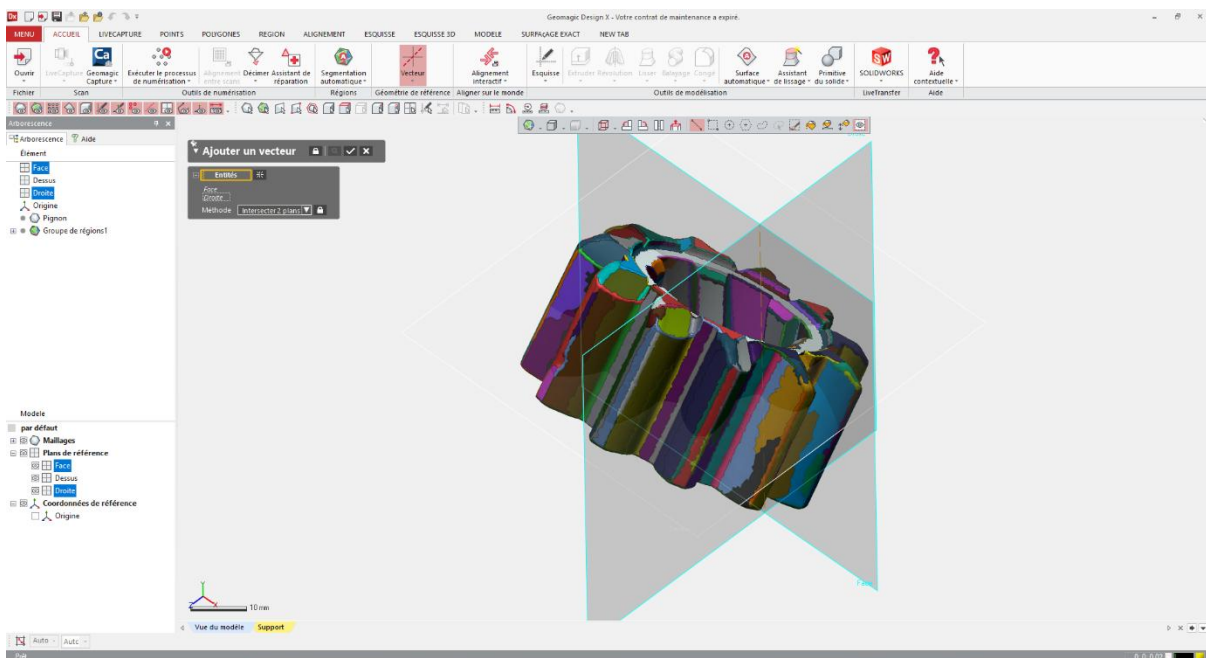


Fig 5.3 : Configuration de vecteur 1

Appuyer sur **valider** pour effectuer l'opération

**Résultat de vecteur 1 :**

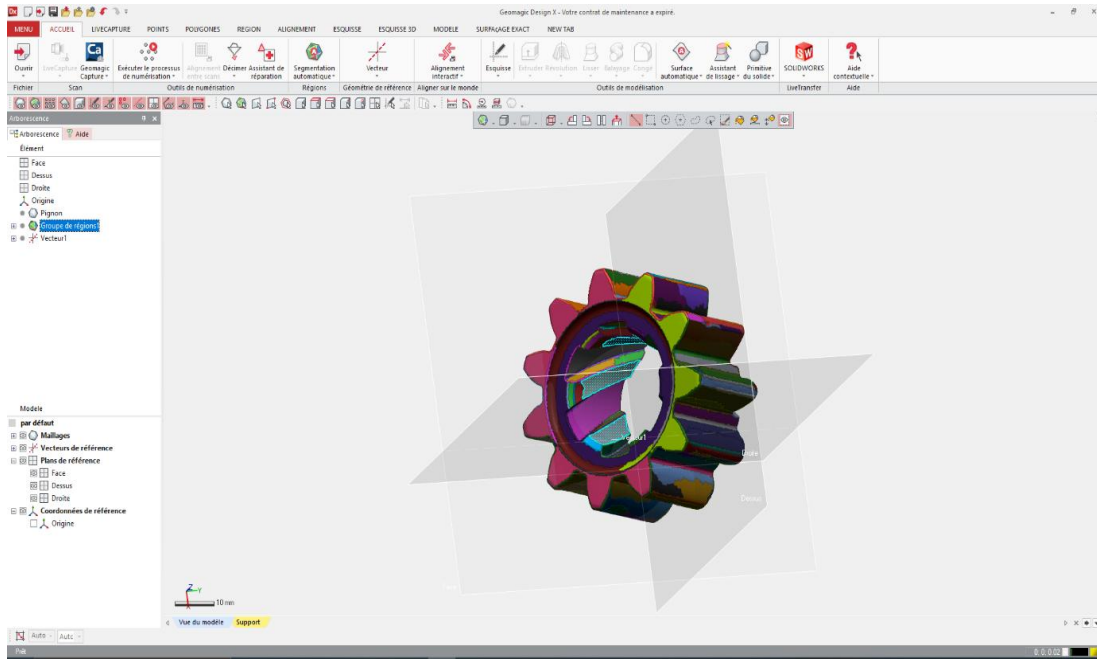
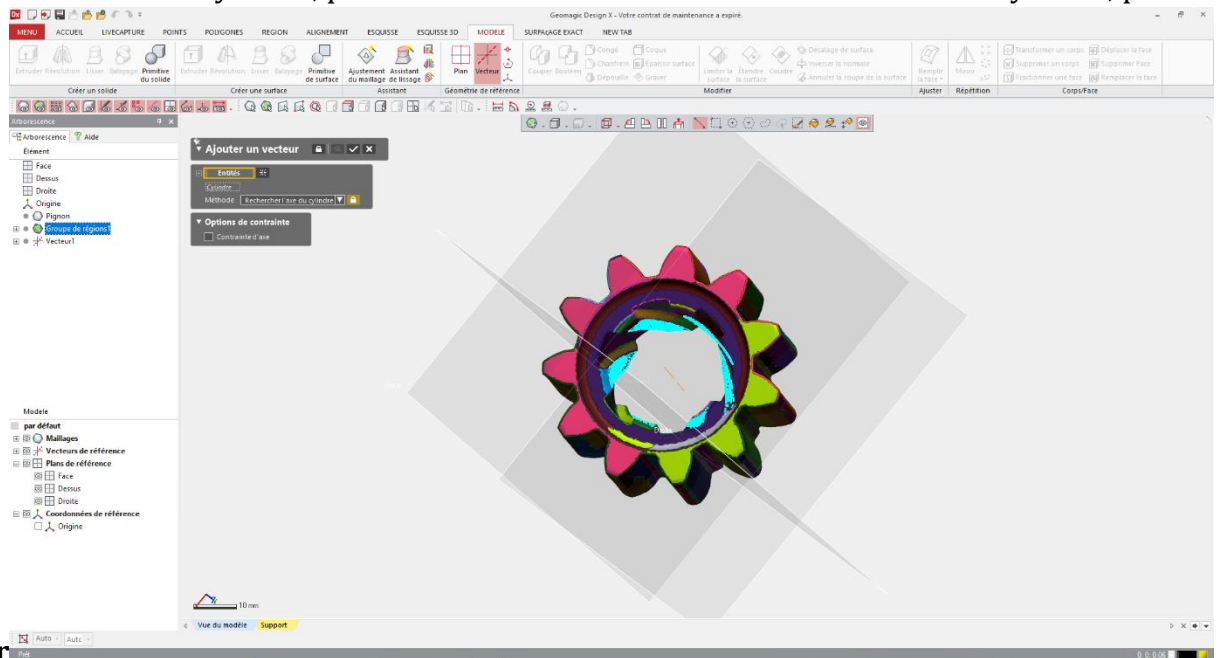


Fig 5.4 : Résultat {vecteur 1}

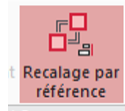
- B- **Fusionner les côtes du cylindre** ; sélectionner un coté identifier comme cylindre puis appuyer sur shift et continuer de sélectionner les autres cotes Sur région sélectionner la fonction **fusionner**
- C- **Ajouter l'axe du cylindre** ; sur **géométrie de référence** sélectionner **vecteur** sur entité on va sélectionner notre cylindre, pour la méthode on va choisi rechercher l'axe du cylindre, puis



valider

Fig 5.5 : L'axe de cylindre

- D- **Recalage des vecteurs** : vecteur 1 (l'intersection du plan de face et de droite) par rapport au vecteur 2 (l'axe du cylindre) ;



Sur alignement sélectionner recalage par référence sélectionner le vecteur 2 puis le vecteur 1

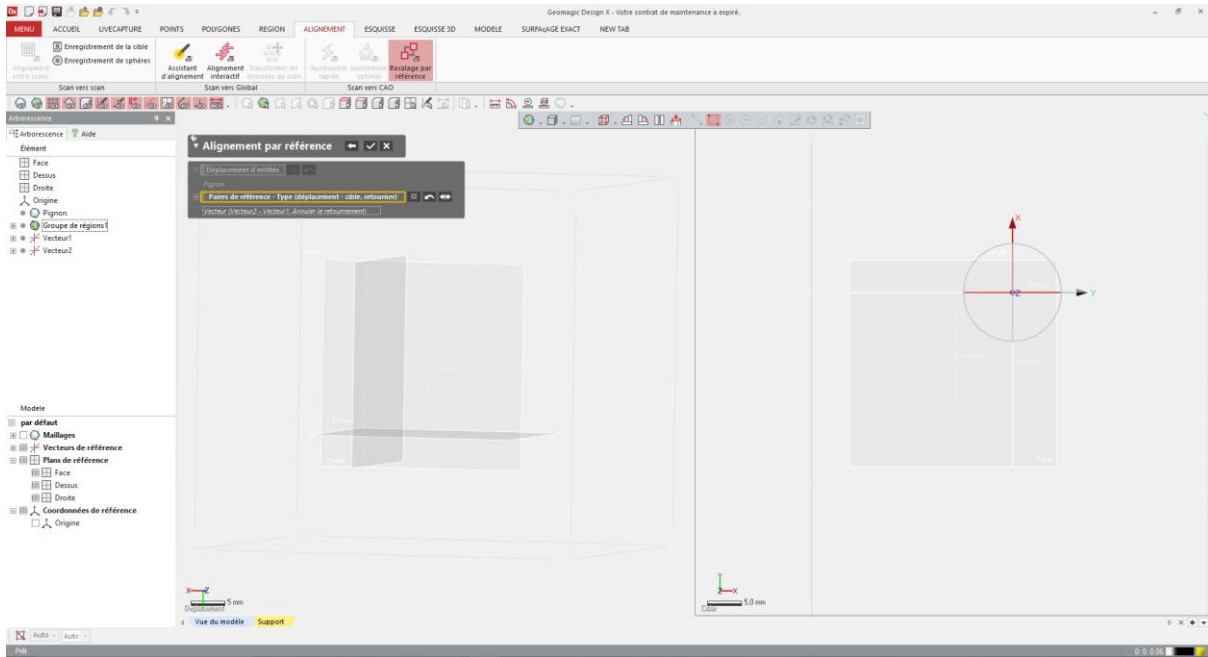


Fig 5.6 : Configuration de recalage des vecteurs 1 et 2

Appuyer sur valider pour effectuer l'opération passé Résultat de recalage (vecteur 2 + vecteur 1) :

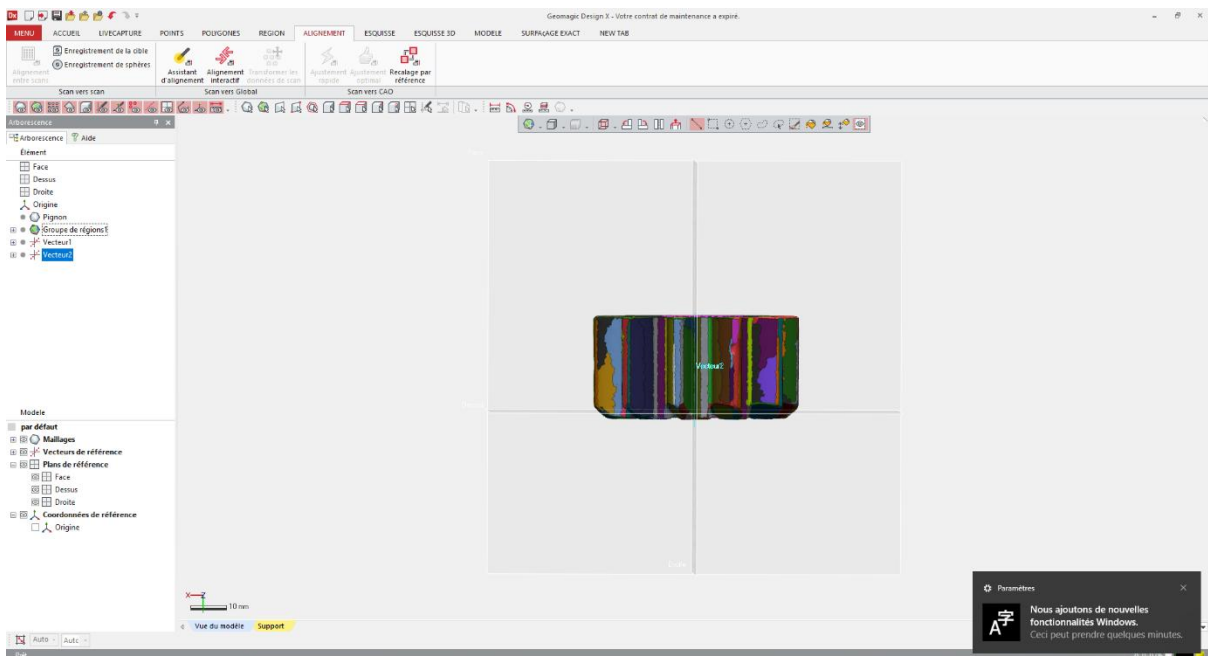
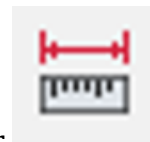


Fig 5.7 : Résultat de recalage des vecteurs 1 et 2

### E- Le décalage de plan de dessus :



Etape 1 : mesurer la distance en appuyant sur la fonction mesurer

## Etape 2 : ajouter un plan (plan 1) : sur modèle dans la géométrie de référence sélectionner plan



, sur entités sélectionner le plan de dessus, comme méthode choisi ; décalage, puis la distance -26mm, puis Valider

Dans cette étape on a créé le plan 1 qui est décalé du 26mm par rapport au plan de dessus

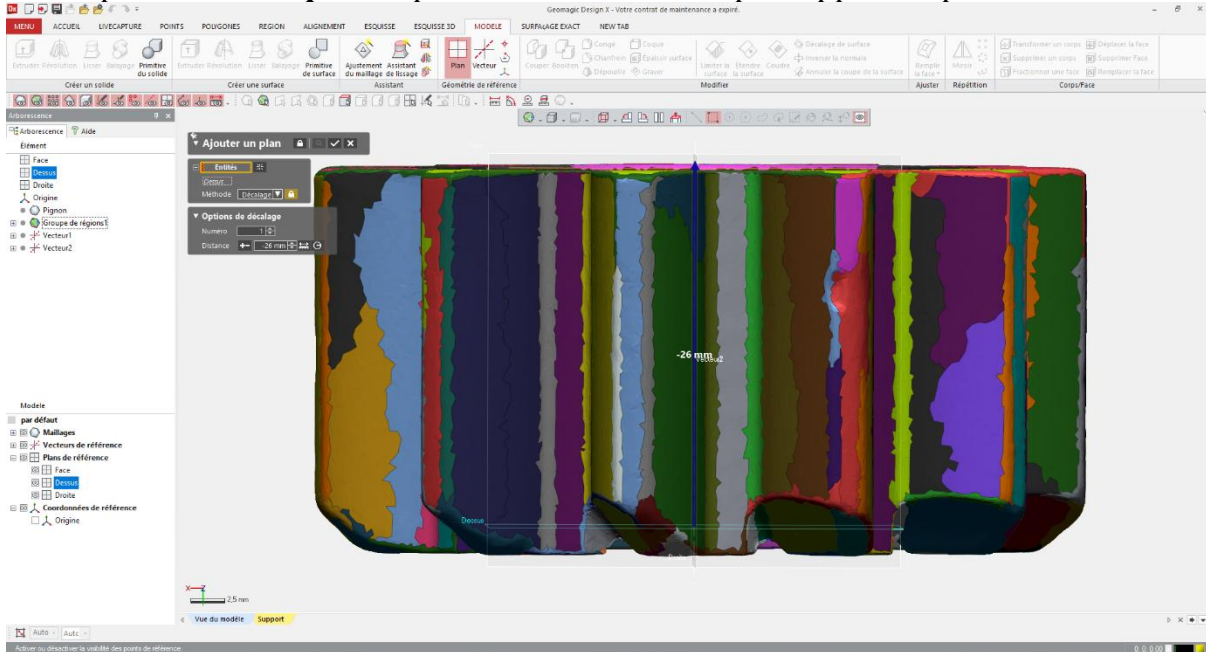


Fig 3.8 : Plan 1 ajouté

## Etape 3 : recalage des plans (déplacer le plan de dessus vers le plan 1) :



Sur alignement choisir la fonction recalage par référence pour le pair de référence - type (déplacement - cible - retourner) sélectionner plan1 puis plan de dessus

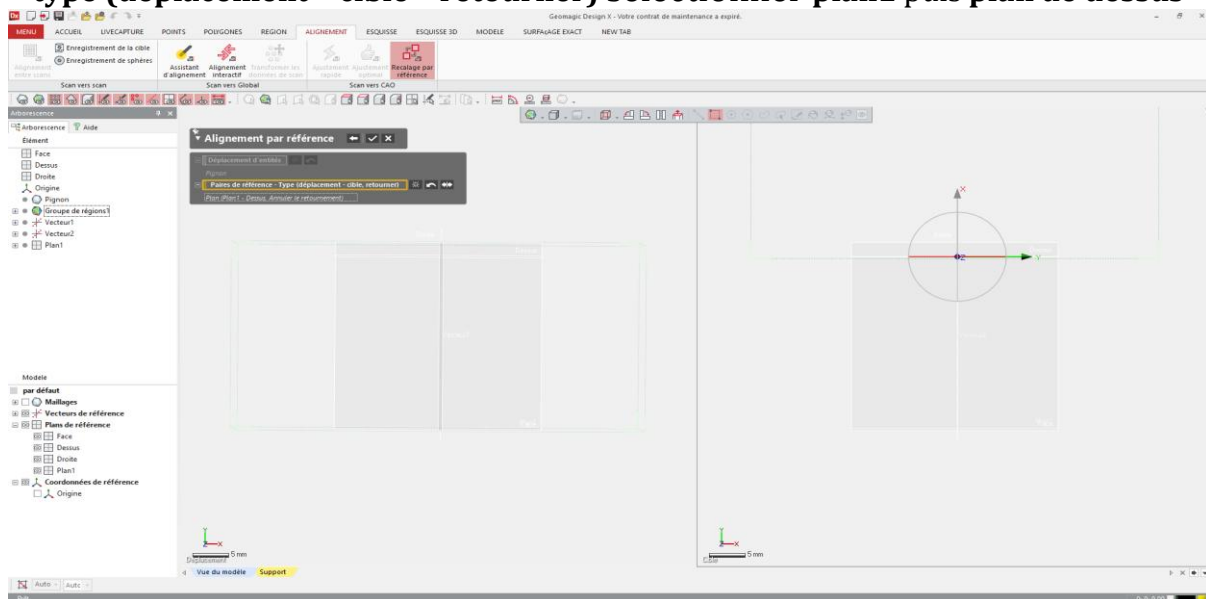
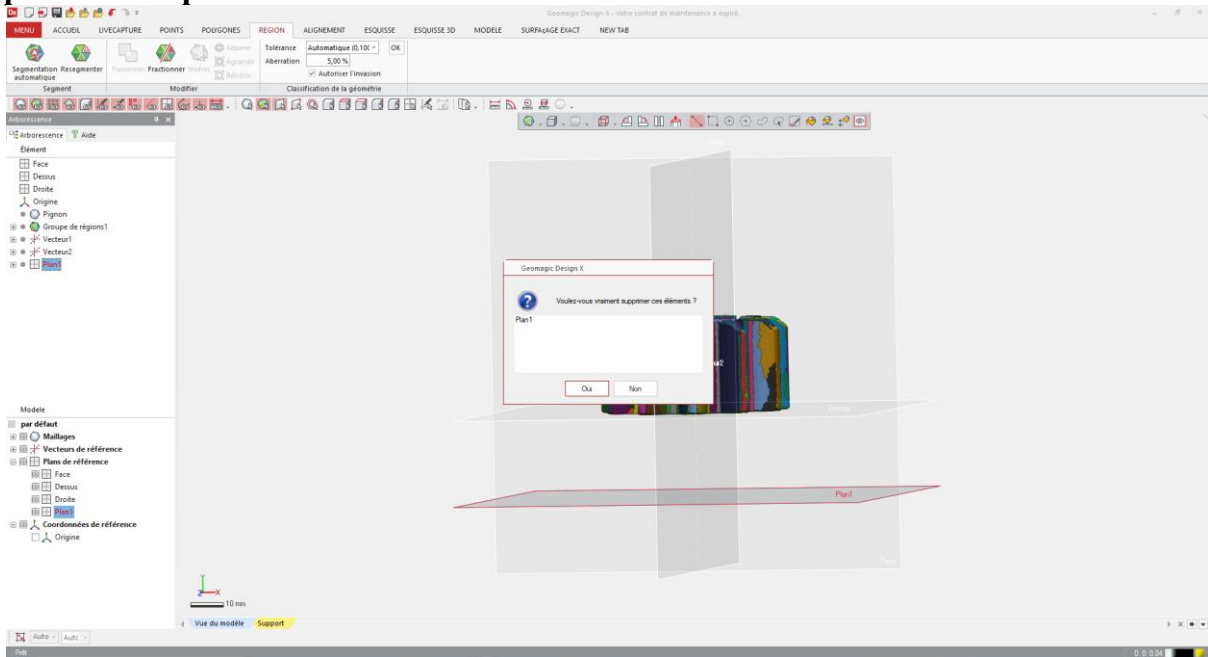


Fig 3.9 : Configuration de recalage des plans

Puis Valider pour effectuer l'opération On a déplacé le plan de dessus vers le plan 1 pour qu'il sera à la base de notre pièce Maintenant on va supprimer le plan 1 car il n'a aucune utilité : appuyer avec le bouton droit de la souris sur le plan 1 puis appuyer sur supprimer après appuyer sur oui pour la

suppression de plan 1  
**La suppression de plan 1 :**

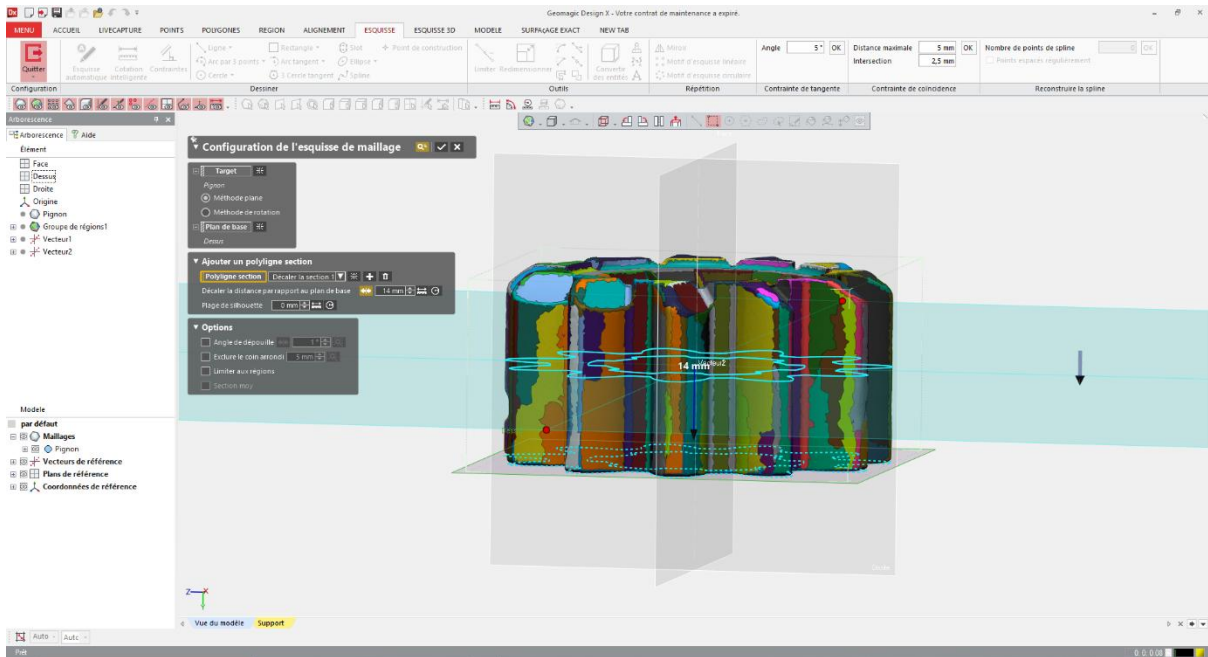


**Fig 3.10 :** La suppression de plan 1

**4- créer le corps 3D :**

**A- Configuration de l'esquisse de maillage 1 :**

Ouvrir l'esquisse sur le plan de dessus, appuyez avec le bouton droit de la souris sur le plan de dessus puis appuyer sur **esquisse**, il apparait un tableau de **configuration de l'esquisse de maillage**  
**Remarque :** on a décalé notre plan d'esquisse pour sélectionner une surface en bon état du corps scanné



**Fig 3.11 :** Configuration du l'esquisse de maillage 1

Puis appuyer sur **valider**, cachez le corps du maillage ; sur la gauche sélectionner **maillage [-]**



pour cacher le maillage

## Esquisse de maillage 1 :

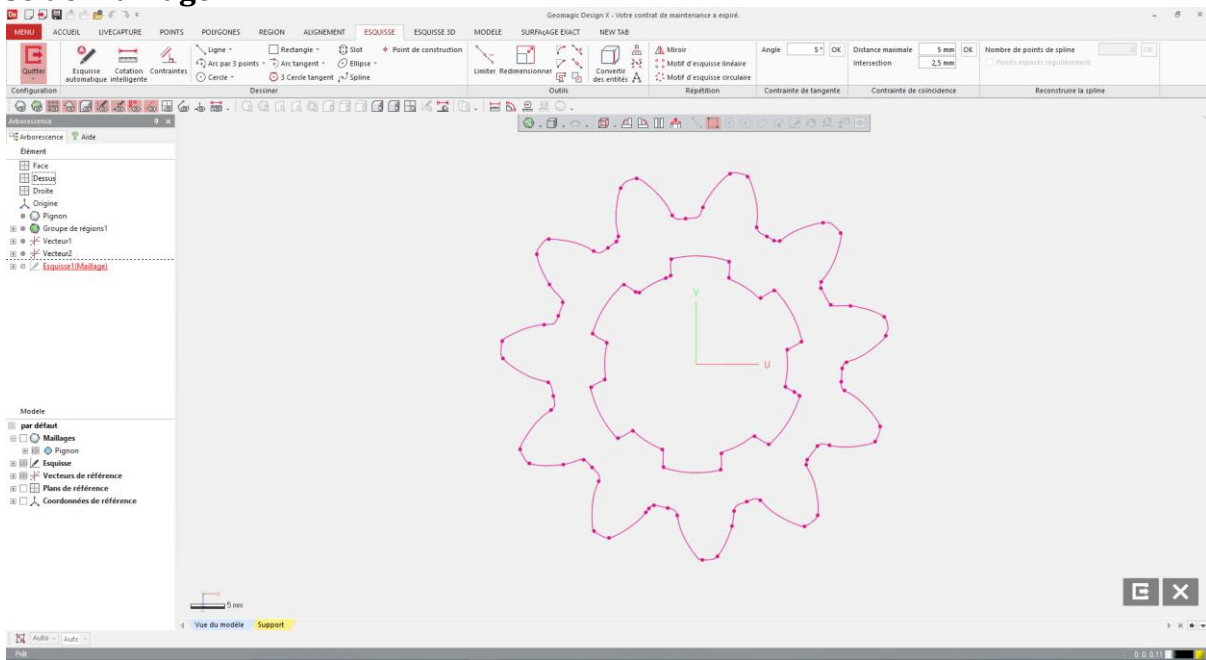


Fig 3.12 : Esquisse de maillage 1

### B- Dessiner le diamètre extérieur :

Sur **esquisse** sélectionner **cercle** puis sélectionner les cotes de diamètre extérieure des dents puis **valider**

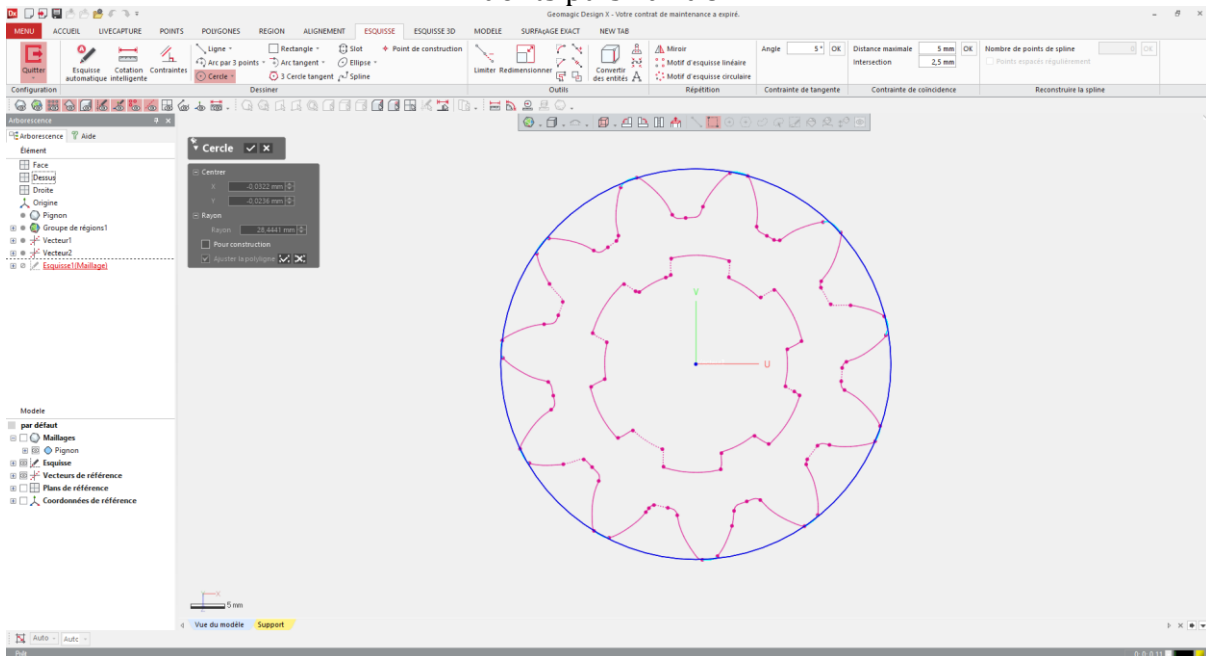


Fig 5.13 : Dessin de diamètre extérieur

### C- Dessiner le diamètre intérieur et les cotes de dent :

Faire la même procédure passé pour le diamètre intérieur, pour dessiner les cotes de dents, cliquez sur la fonction **arc Tangent** puis sélectionner les courbes et **valider**

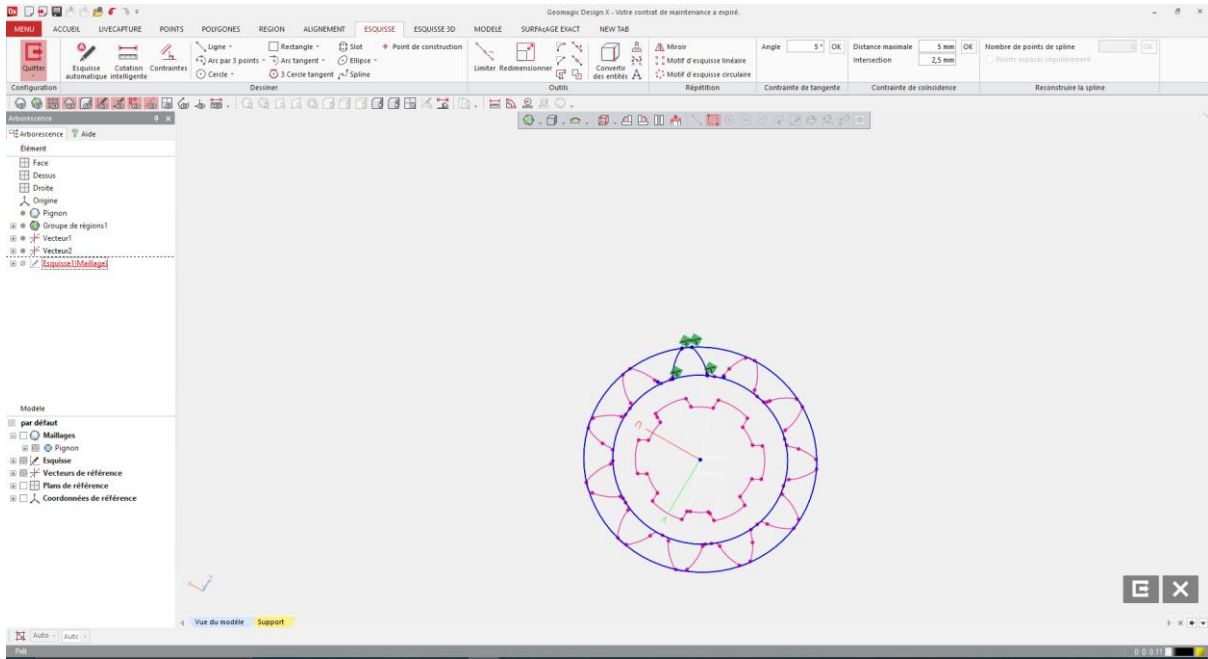


Fig 3.14 : Dessin de diamètre intérieur et les cotes de dent

#### D- Répétition circulaire de la dent :

Sur **esquisse** choisir la fonction **motif d'esquisse circulaire** sur les entités sélectionner toutes les courbes de dents et **Axe Z = 0** et **Axe X = 0** (centre de cercle) avec un nombre de dents = **11** et un angle de **360°**

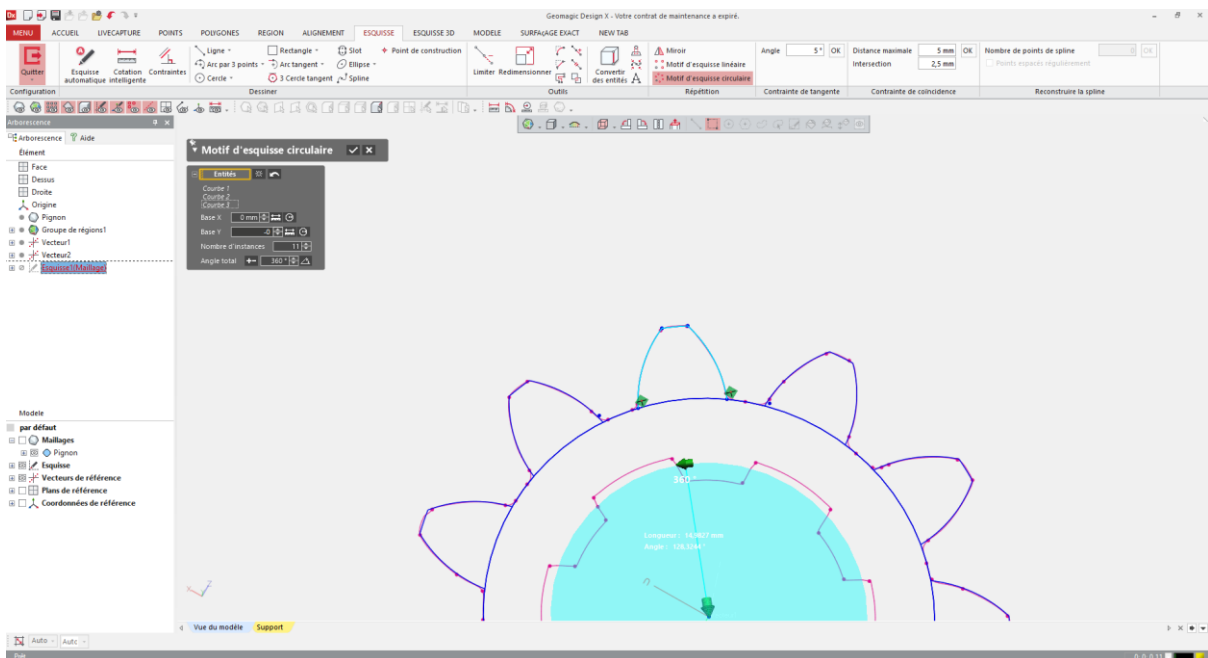


Fig 3.15 : Configuration du motif d'esquisse circulaire de la dent

Puis appuyer sur **valider** pour effectuer l'opération  
**Résultat final de motif d'esquisse circulaire 1 :**

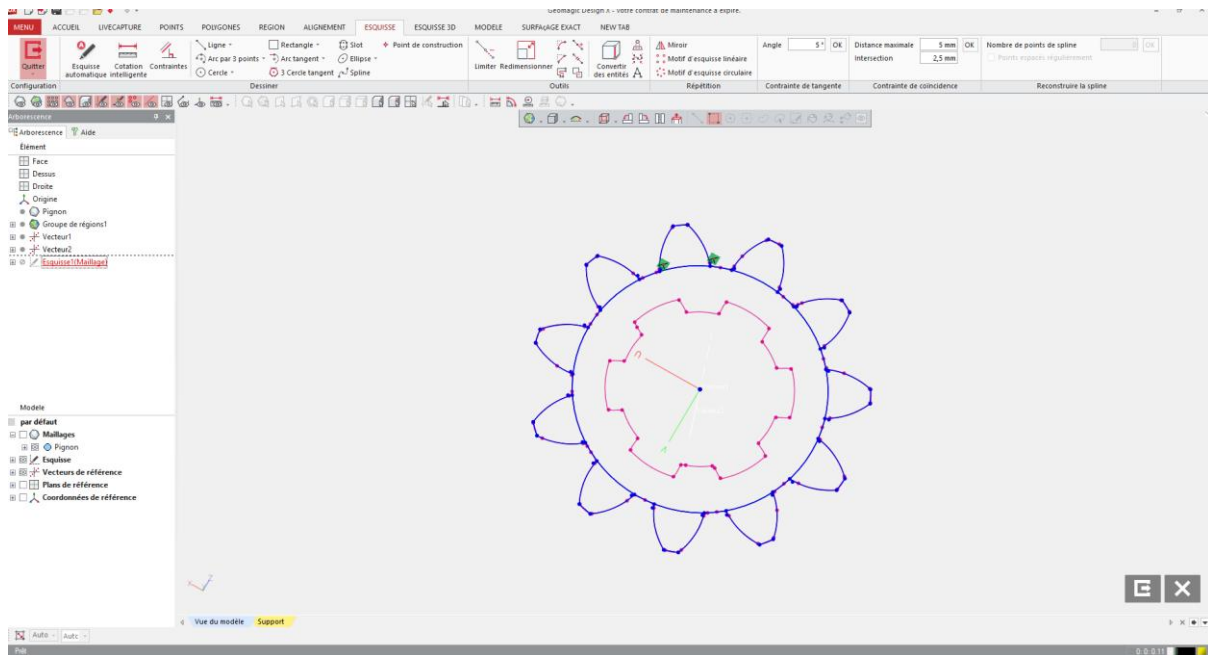



Fig 3.16 : motif d'esquisse circulaire 1

### E- Suppression des courbes :

Pour supprimer les courbes de diamètre de base on va utiliser la fonction **Limiter**  situer dans **les outils**, puis appuyer sur les courbes pour les supprimer après **valider** pour effectuer l'opération

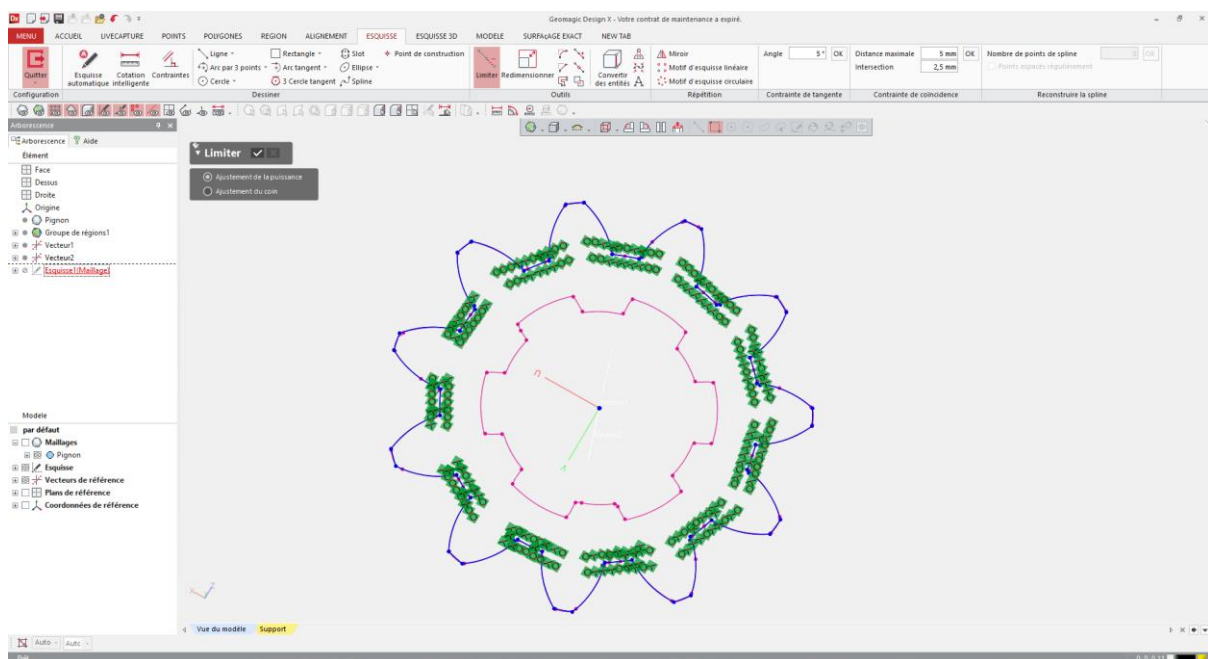


Fig 5.17 : Suppression des courbes de l'esquisse de maillage 1

### F- Mesurer la hauteur de corp :

On va mesurer la hauteur pour connaitre la distance extrudée de l'étape prochaine, appuyer sur



la fonction **mesurer** et puis mesure la hauteur de la pièce (résultat =28,0992)

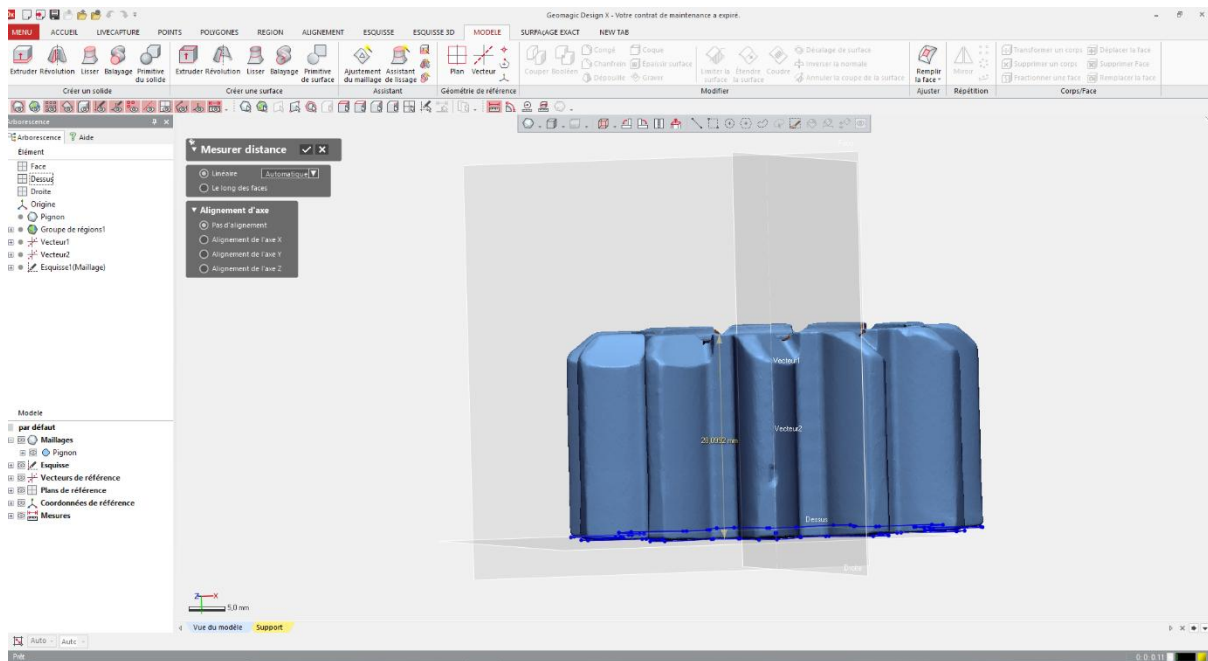


Fig 3.18 : Mesurer la hauteur de corps

### G- Extruder le corps (Extruder 1) :

Appuyer sur **model** puis



sélectionner la fonction **Extruder** comme **profils** sélectionner **l'esquisse du maillage 1** après modifier **la longueur** vers 28.0992, après **valider** pour effectuer l'opération

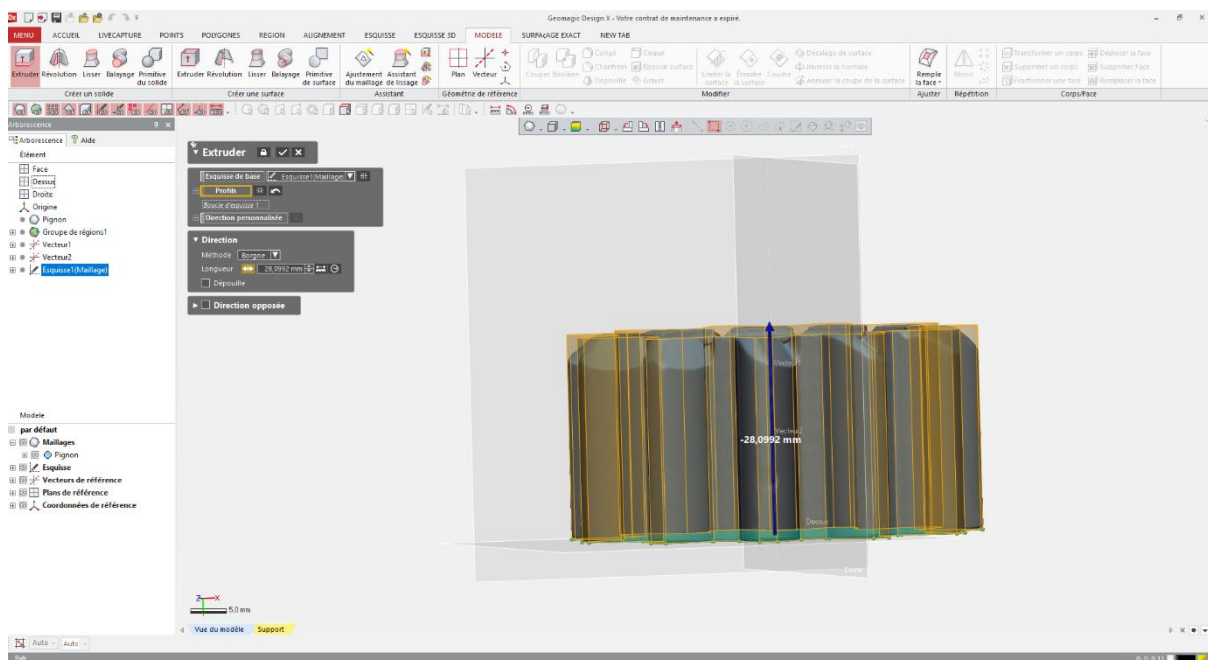



Fig 3.19 : Résultat de l'Extruder 1

## H- Comparaison avec le corps original :

Pour faire la comparaison de corp 3D qu'on a créé par rapport au corp scanné on va appuyer sur  cette fonction va nous montrer la comparaison avec des couleurs sur un échelé de tolérance personnalisé

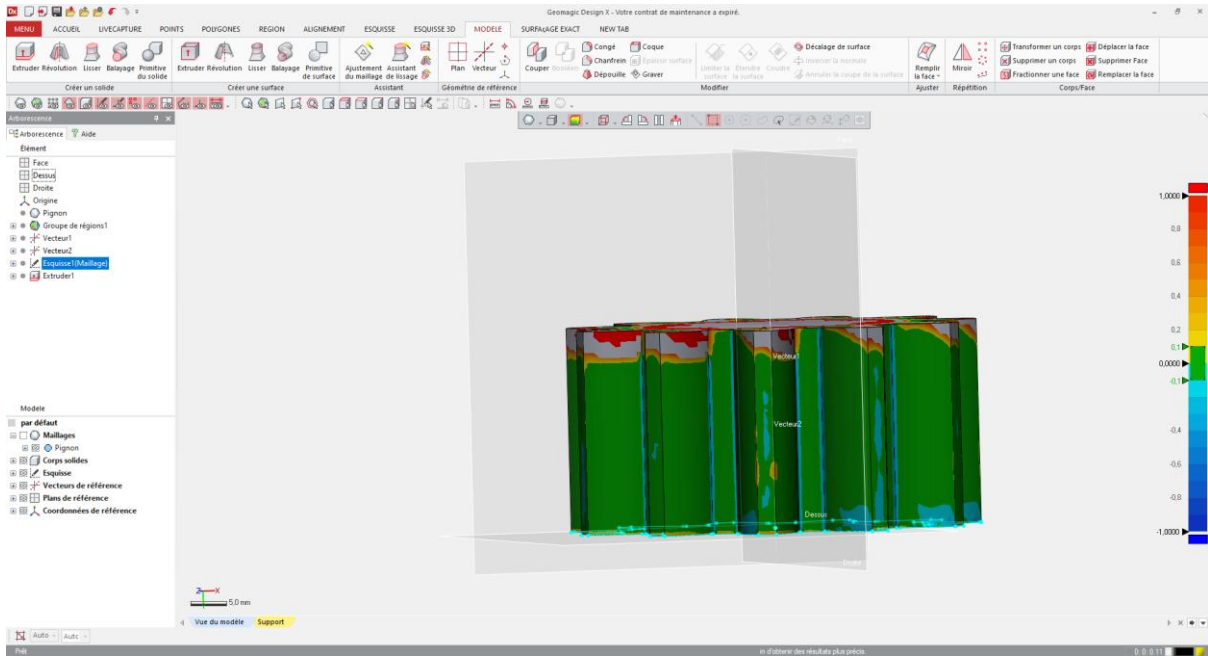


Fig 3.20 : Comparaison avec le corps original

## 5- Enlèvement de la matière :

### A- Enlèvement de la matière du cercle inférieur :

a- Ouvrir l'esquisse sur le plan de dessus : cliquez avec le bouton droit de la souris sur le plan de dessus puis cliquez sur **esquisse**

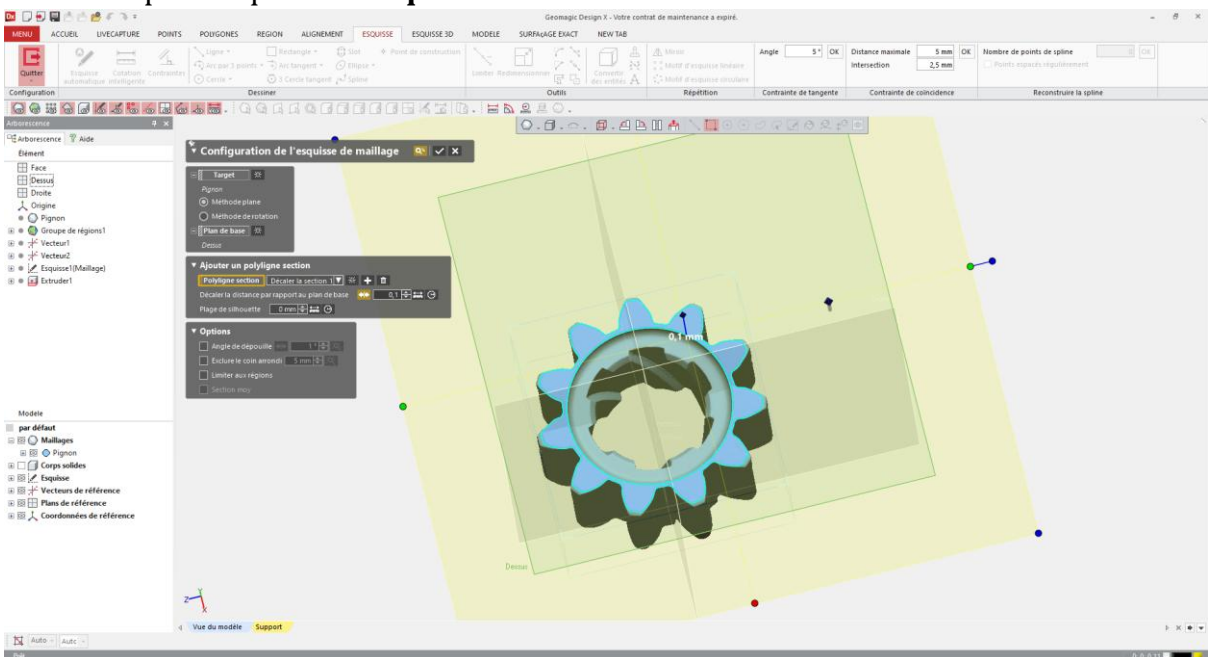


Fig 5.21 : Configuration du l'esquisse de maillage du cercle inférieur

## b- Extruder le cercle :

après avoir dessiné le cercle, sur **model** sélectionner **Extruder**, pour le **profil** sélectionner le cercle dessiné, sélectionner une longueur de -1.8mm, sur **opérateur de résultat** cocher sur **couper** puis **valider** pour effectuer l'opération

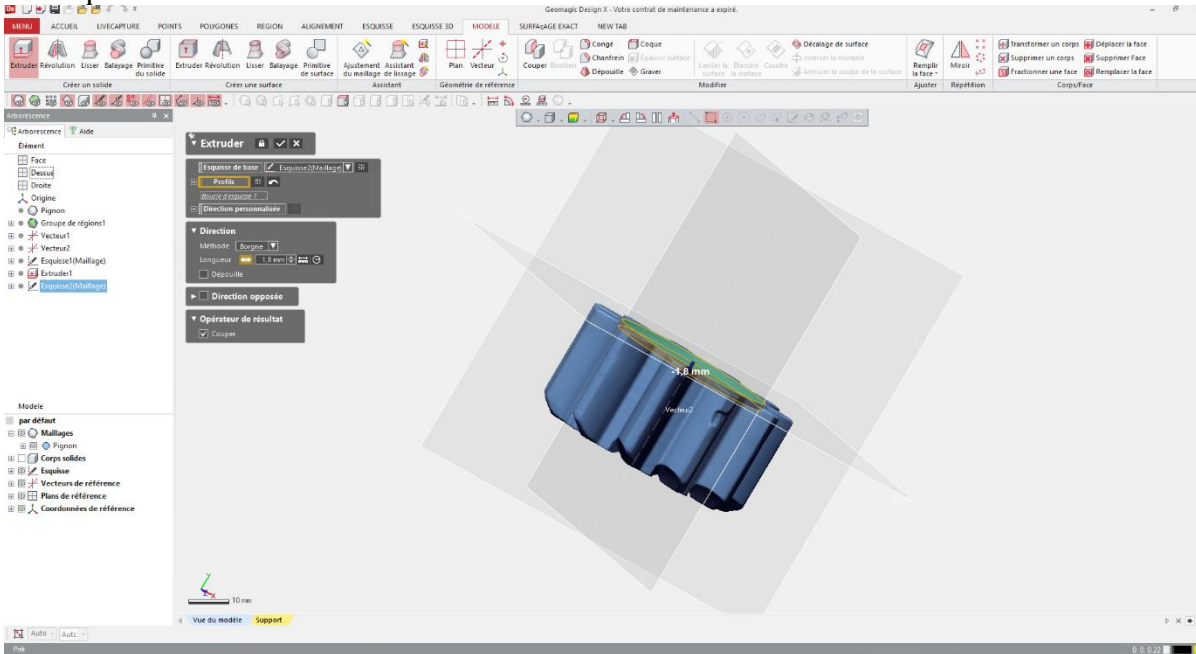


Fig 5.22 : Configuration de l'Extruder de cercle inférieur

## B- Enlèvement de la matière du cercle supérieure :

a- **Extraire le plan 1** : dans cette opération on va créer un nouveau plan pour faire une esquisse de cercle supérieure, sur le plan présenté dans la figure sous dessus cliquez avec le bouton droit de la souris puis appuyer sur

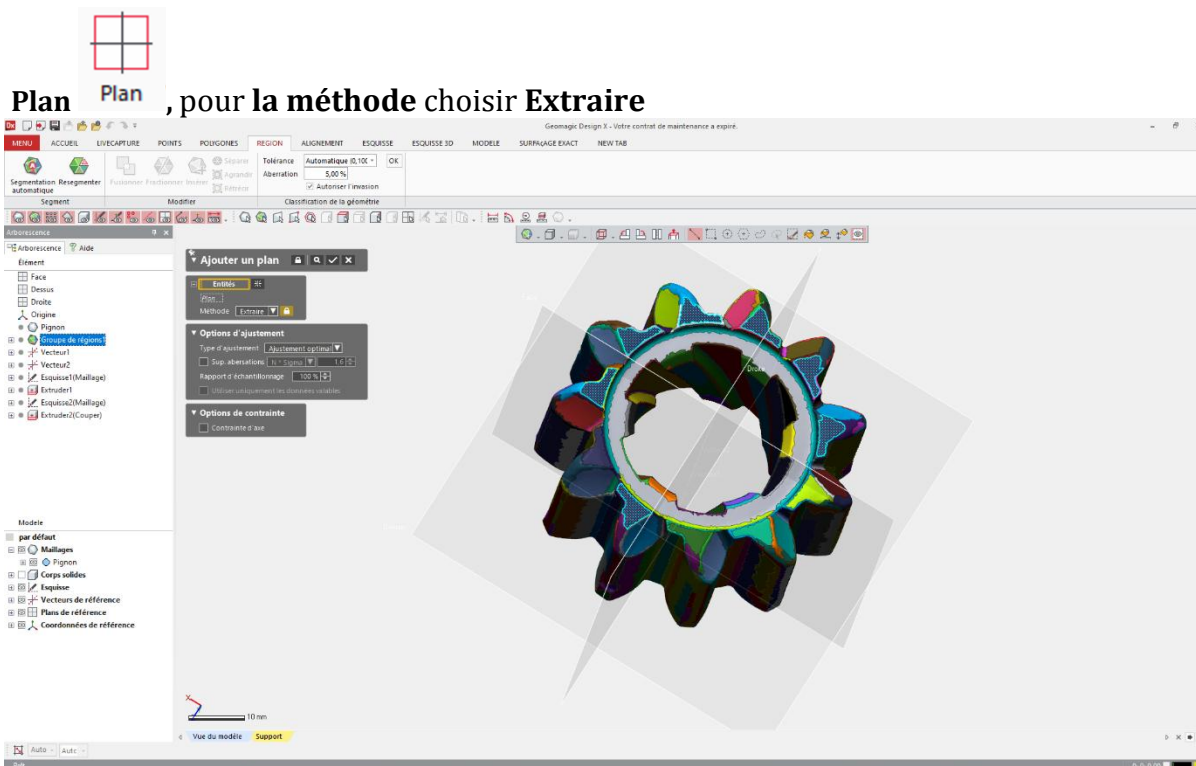
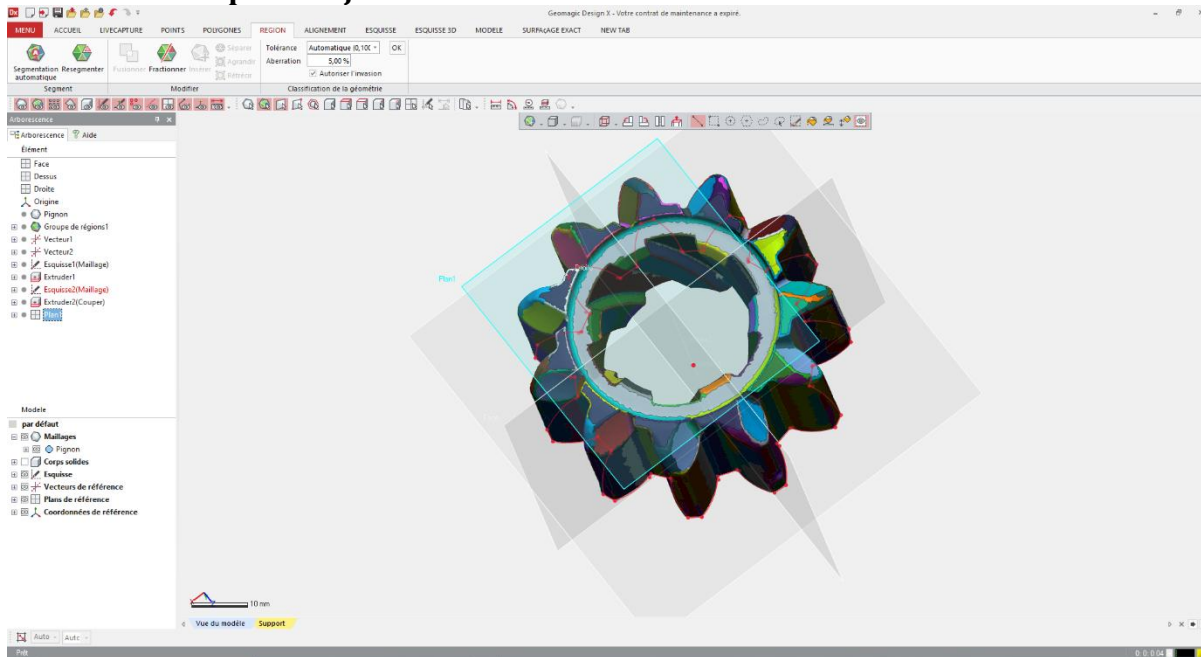


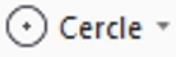
Fig 5.23 : Extraire le plan 1

Puis **valider** pour effectuer l'opération  
**Résultat finale plan 1 ajouté :**




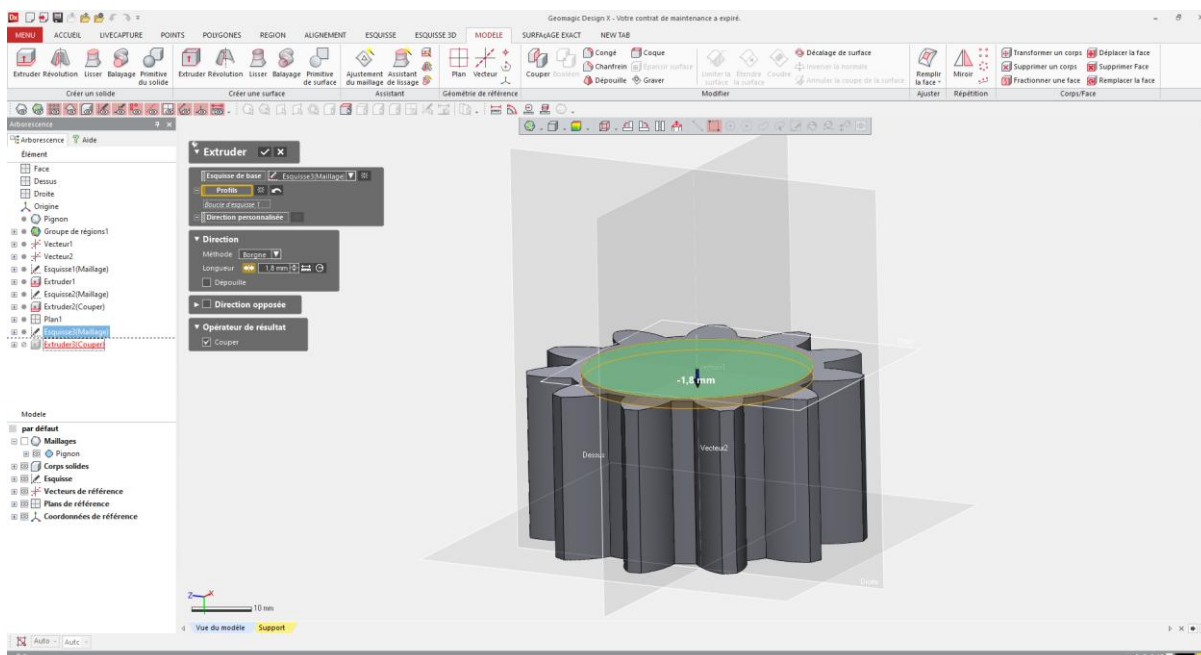
**Fig 5.24 :** plan 1 ajouté

**b- Dessiner le cercle supérieur :** sur **esquisse** sélectionner

**Cercle**  après dessiner le cercle puis **valider** pour effectuer l'opération

**c- Extruder Le cercle supérieure :** sur **modele** sélectionner la fonction

 **Extruder** sur **profils** sélectionner le **cercle dessiné** avec une longueur de 1.8mm, sur **opérateur de résultat** cocher sur **couper** puis **valider** pour effectuer l'opération



**Fig 5.25 :** l'Extruder de cercle supérieur

## C- Enlèvement de matière pour les dents :

### a- Extraire le plan 2 :

Cliquez avec le bouton droit de la souris sur le plan montré sur la figure sous

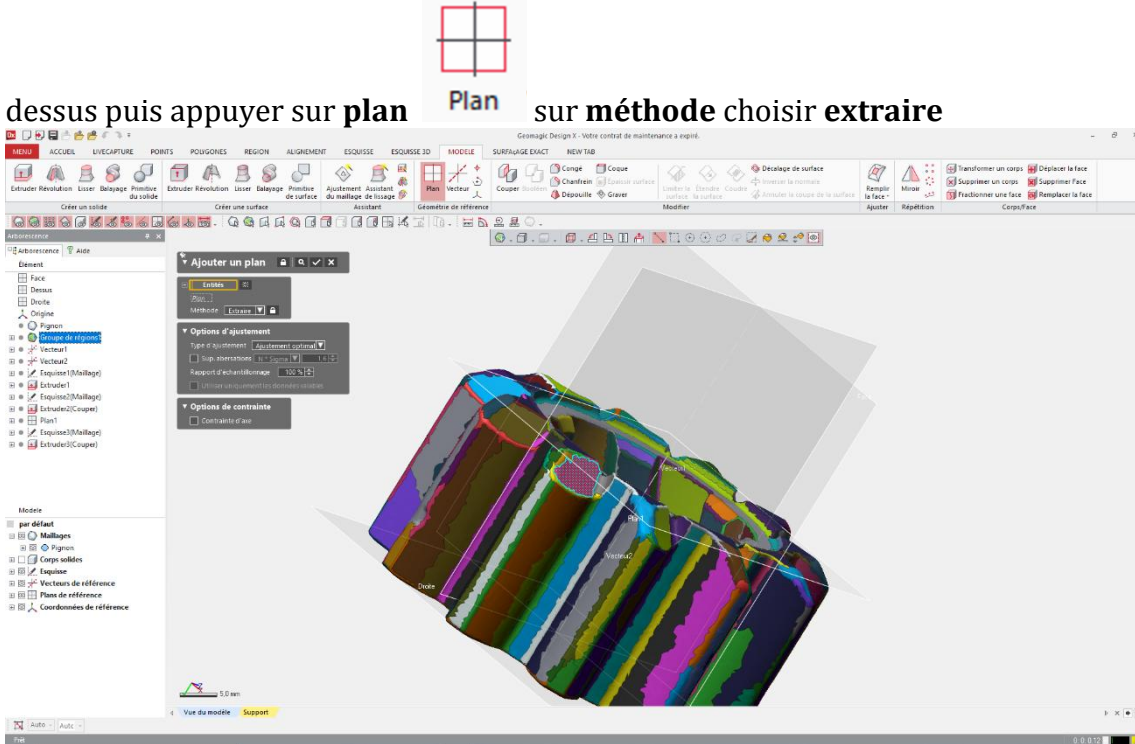


Fig 5.26 : Configuration du l'Extraire de plan 2

Puis valider pour créer le plan2

### Résultat finale : plan 2 ajouté

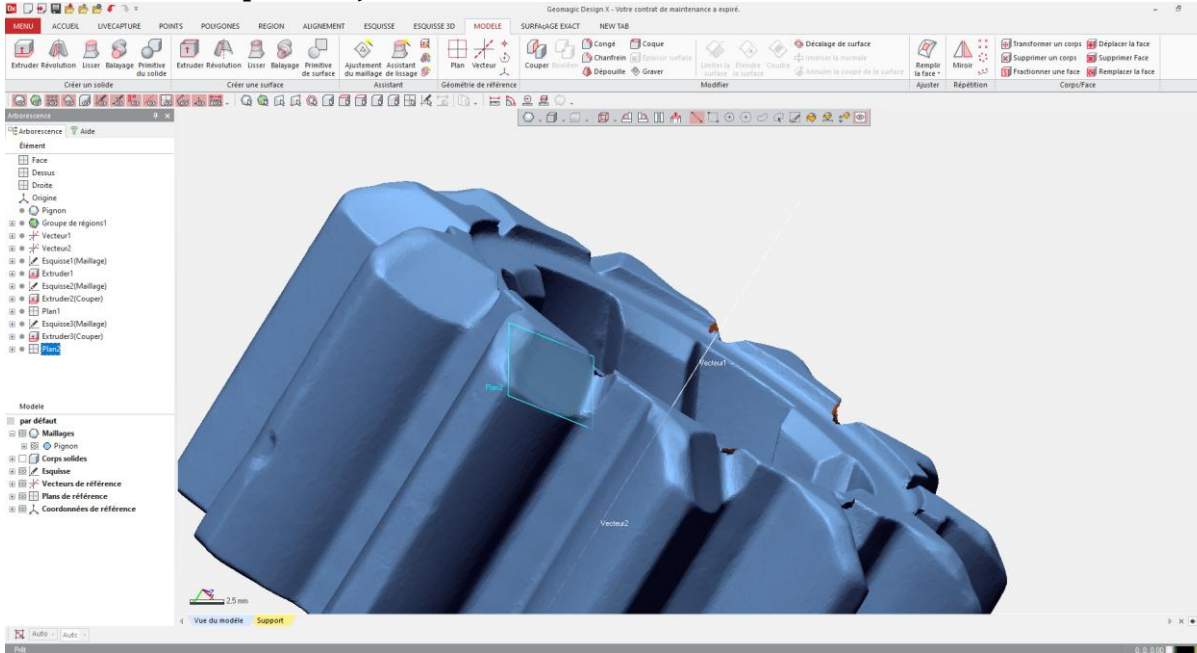

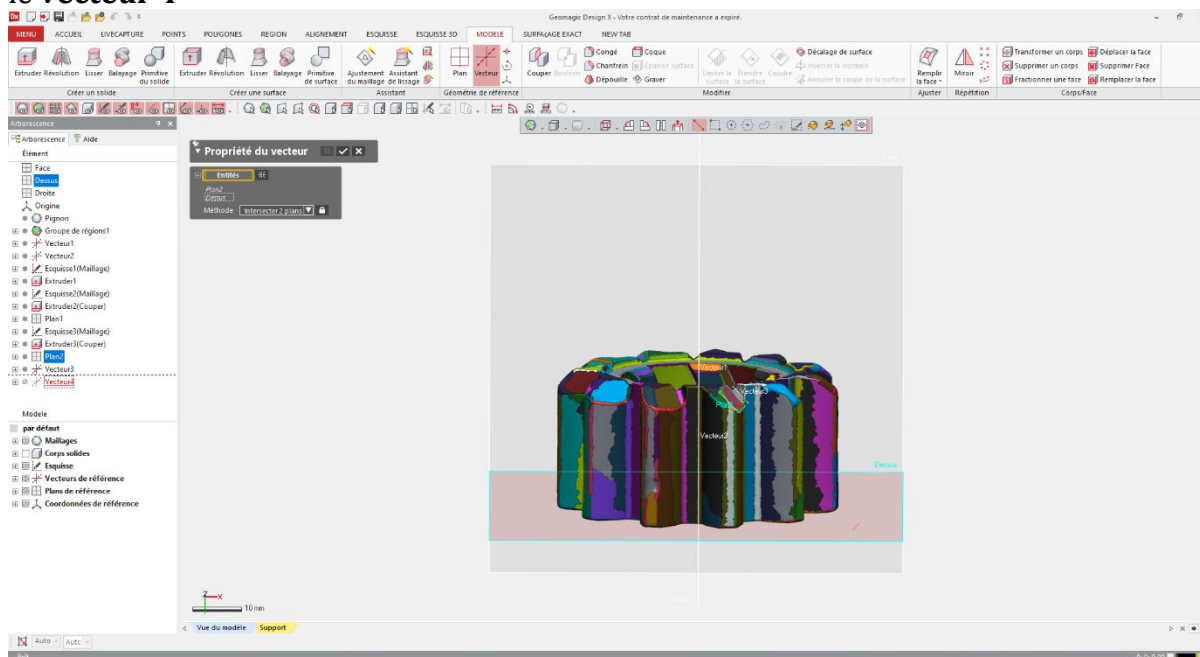


Fig 5.27 : Plan 2 ajouté

### b- Créer le vecteur 4 :

On va créer un vecteur qui va intersecter le plan 2 et le plan de dessus

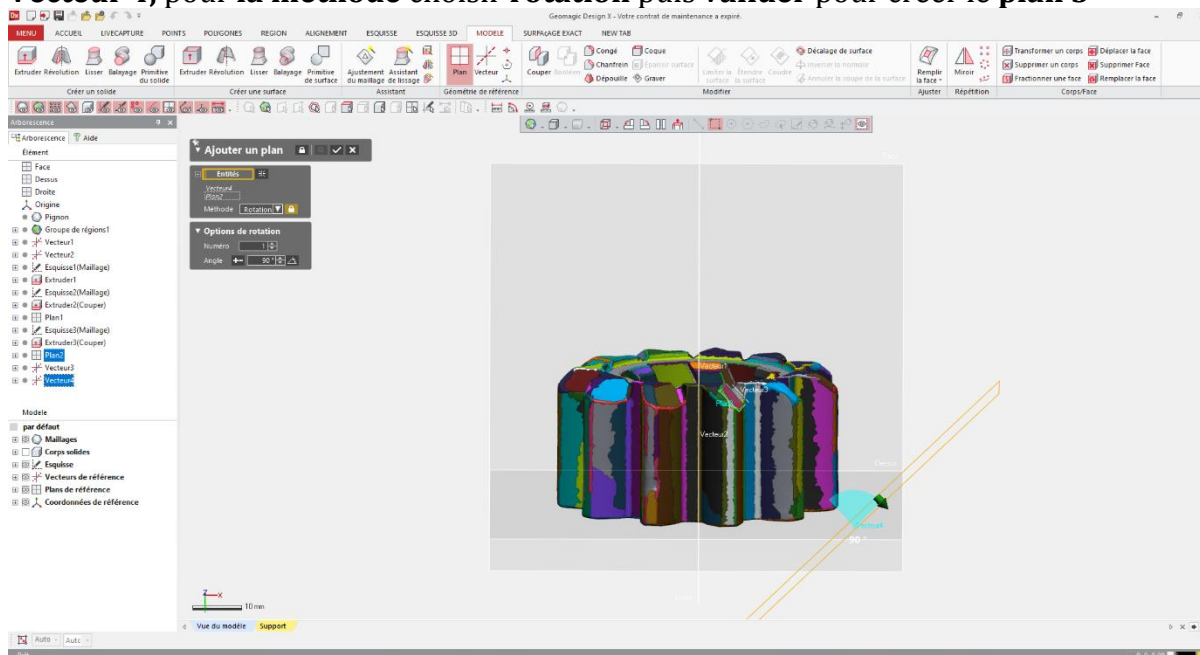
Sur **modele** appuyer sur **vecteur**  sur **entités** sélectionner **Plan 2** et **plan de dessus**, pour la méthode choisir **intersecter 2 plan** puis **valider** pour créer le **vecteur 4**



**Fig 5.28 :** Configuration de vecteur 4

**c- Créer le plan 3 :**

Sur **modele** appuyer sur **plan**  sur **Entités** sélectionner **le plan 2** et **Vecteur 4**, pour la méthode choisir **rotation** puis **valider** pour créer le **plan 3**



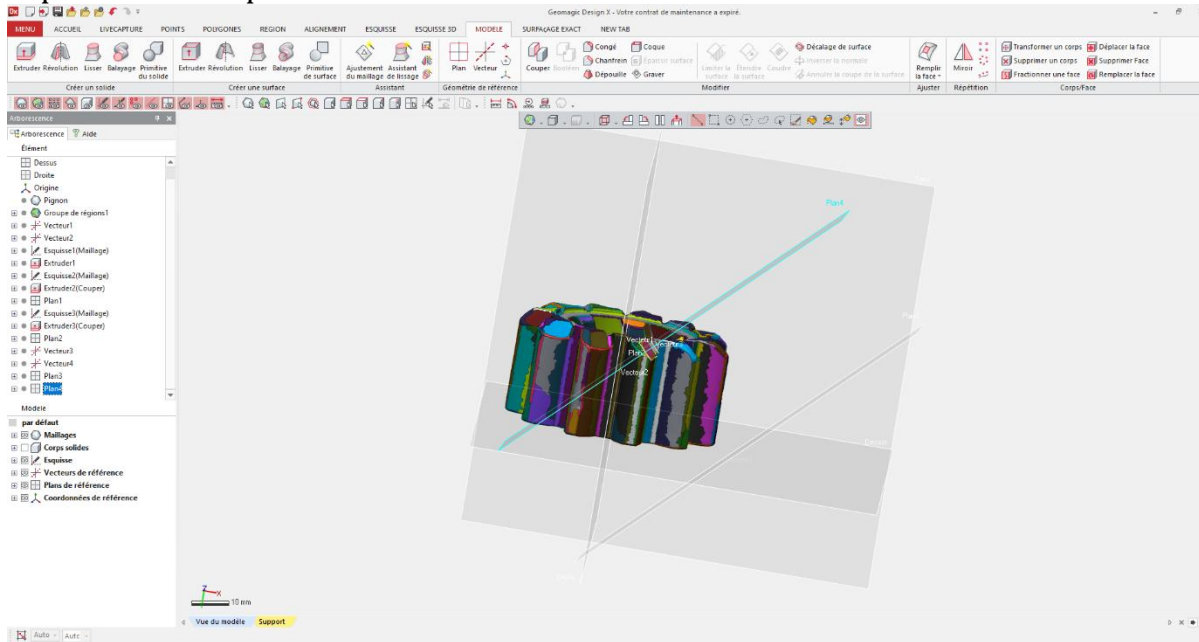
**Fig 5.29 :** Création de plan 3

**d- Créer le plan 4 :**

Avec le bouton droit de la souris appuyer sur le plan 3 et sélectionner



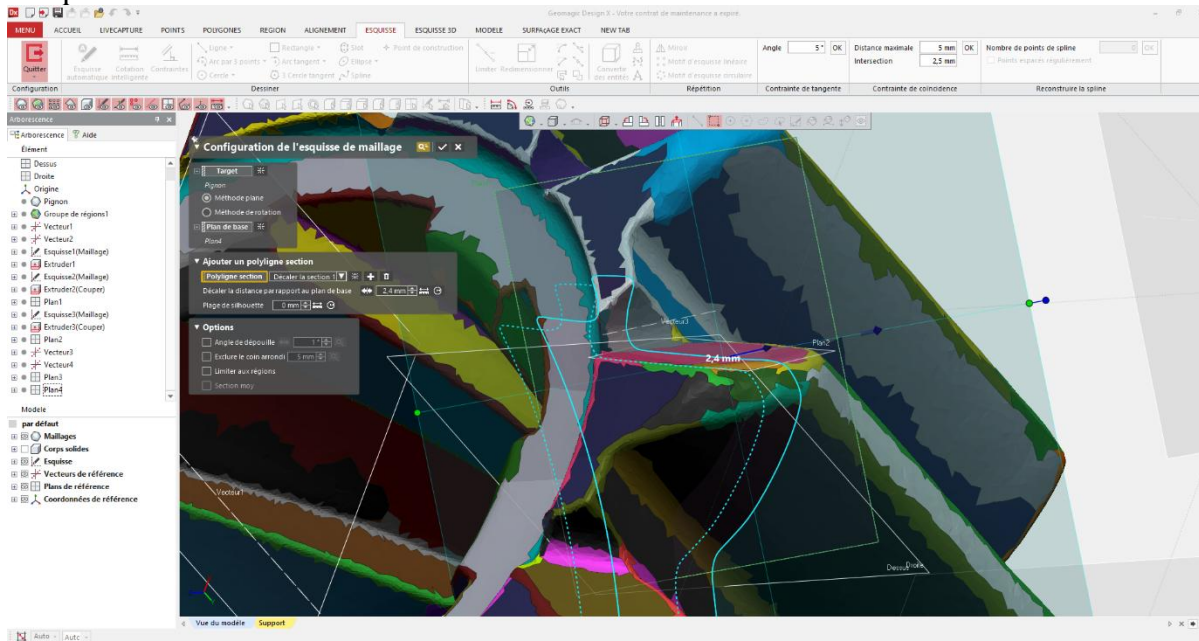
**Plan** , sur **méthode** choisir **décalage** puis décaler le plan jusqu'il déplacera vers le plan 2



**Fig 5.30 : Création de plan 4**

**e- Configuration de l'esquisse de maillage 4 :**

Ouvrir l'esquisse de maillage sur le plan 4, puis décaler le plan par rapport au plan de base avec une distance de 2.4mm puis **valider** pour dessiner sur l'esquisse



**Fig 5.31 : Configuration de l'esquisse de maillage 4**

Avec les outils de dessin (ligne, arc tangent) dessiner la forme montrée dans la figure sous dessus puis **valider**

**Esquisse de maillage 4 :**

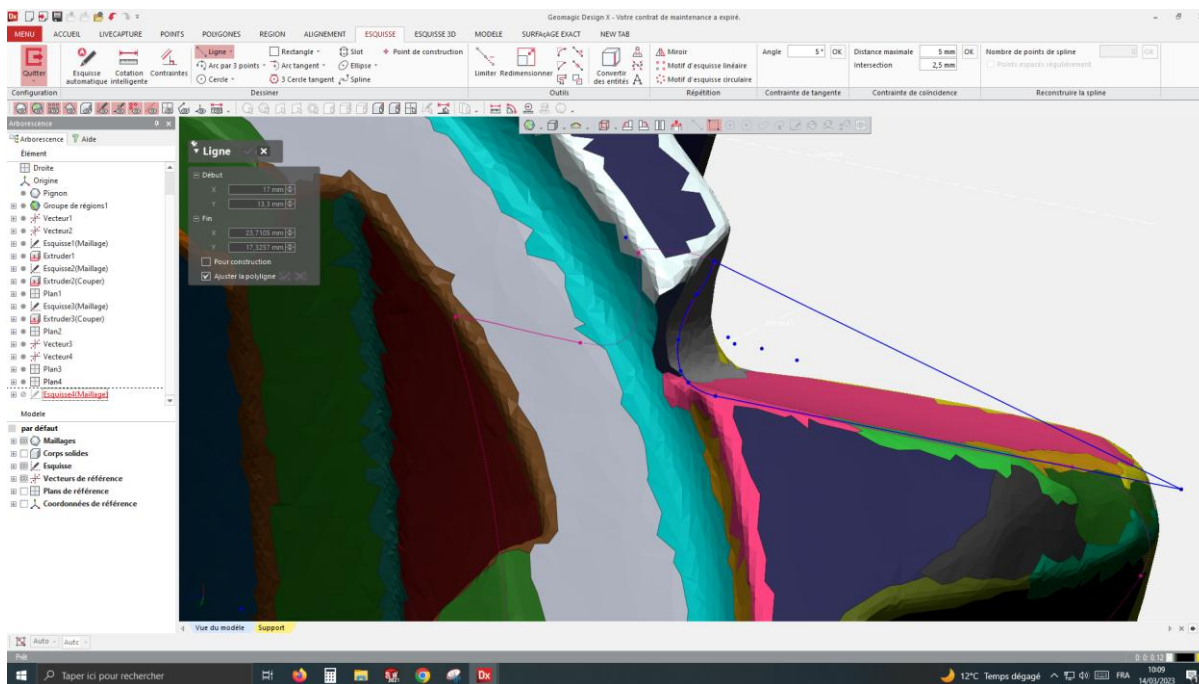
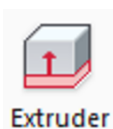


Fig 5.32 : L'esquisse de maillage 4

a- Extruder l'esquisse de maillage 4 (Extruder 4) :



Sur **modele** appuyer sur **Extruder** pour le **profil** sélectionner l'esquisse de maillage 4, sur la **direction personnalisée** choisir le **vecteur 3** (**axe de cylindre de dent**), **Direction** : longueur = 5,48mm, utiliser une **direction opposée** d'une longueur = 3,5mm

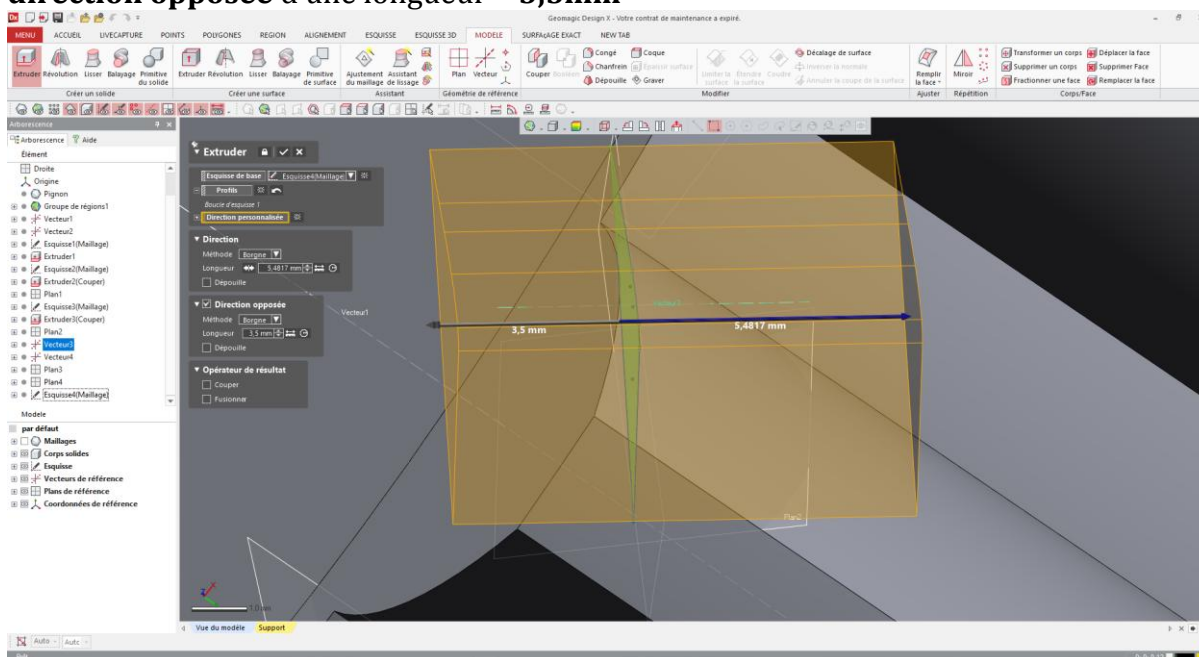


Fig 5.33 : Configuration du l'Extruder du l'esquisse de maillage 4

Puis **valider** pour extruder l'esquisse  
**Résultat de Extruder 4** :

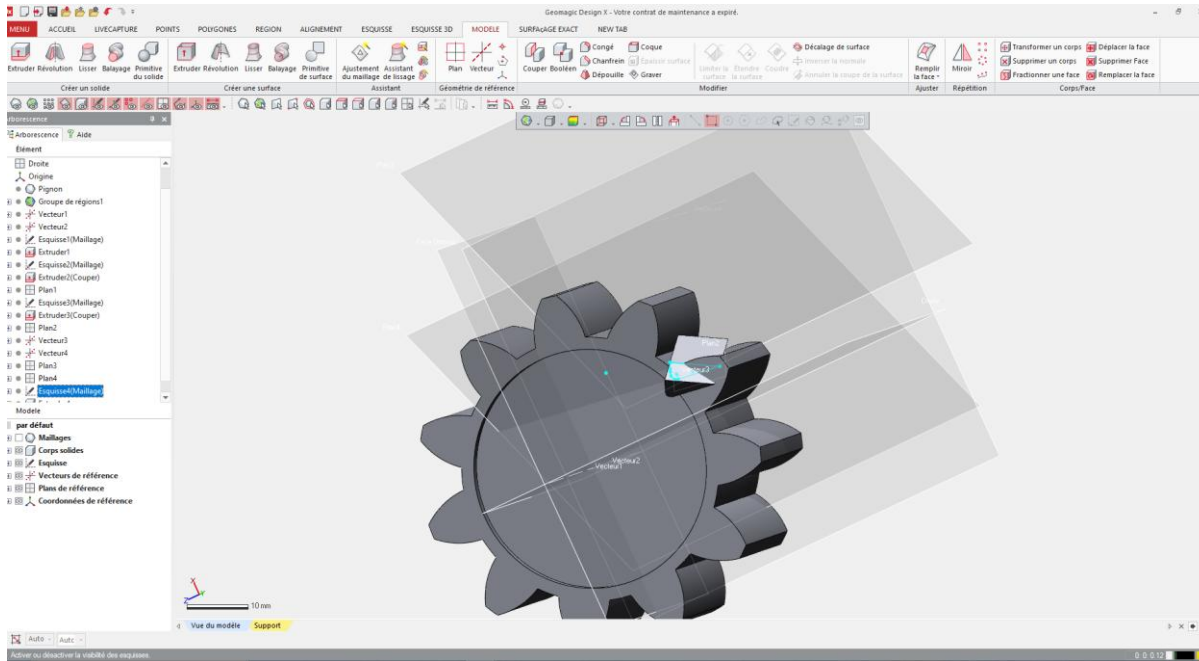



Fig 5.34 : Résultat de Extruder 4

### b- Répétition circulaire de l'extruder 4 :

Pour faire une répétition circulaire de l'opération passé sur les dents restants, sur **modele** choisir la fonction **motif circulaire** , sélectionner le corps **extruder 4**, pour l'axe de rotation choisir le **vecteur 1 (axe de cylindre)**, **Nombre d'instances=11**, **angle 360°** après appuyer sur **valider** pour effectuer l'opération

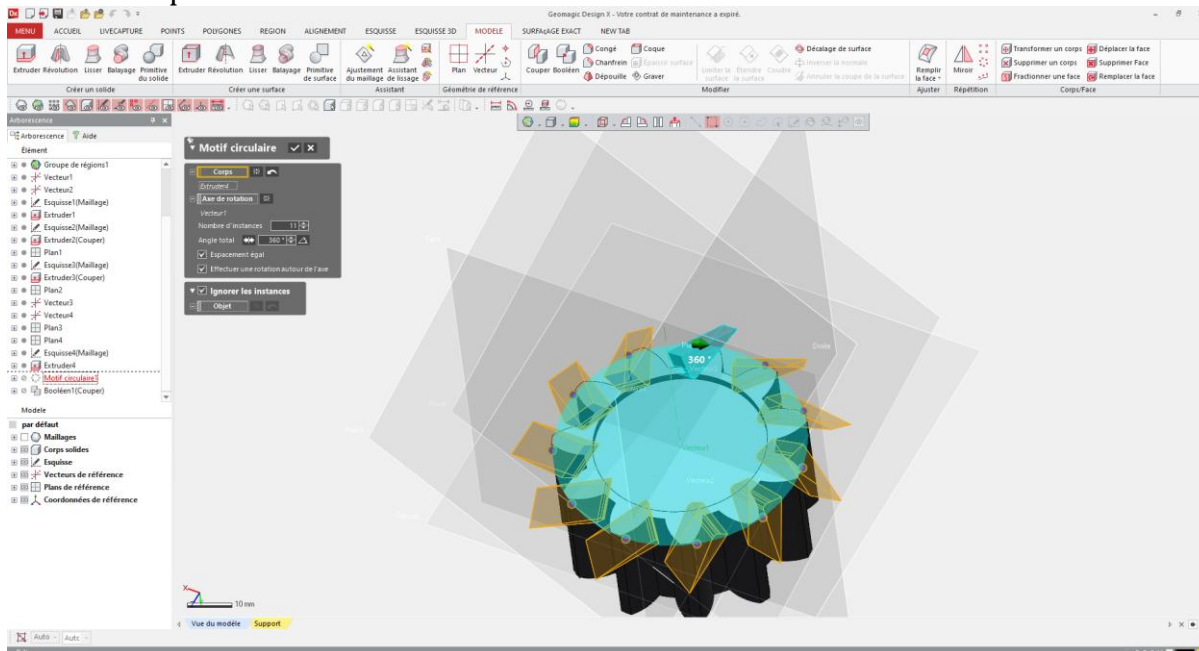


Fig 5.35 : Répétition circulaire de l'extruder 4

### c- Couper les corps (Booléen 1) :

Pour couper les corps créé autour des dents, sur **modele** choisir la fonction



**booléen** , pour la **méthode d'opération** choisir **couper**, pour les **corps d'outils** sélectionner les corps créés par la répétition circulaire sur les dents, pour le **corps cibles** sélectionner **extruder 3 (le corps de pignon)** puis **valider** pour couper les corps d'outils

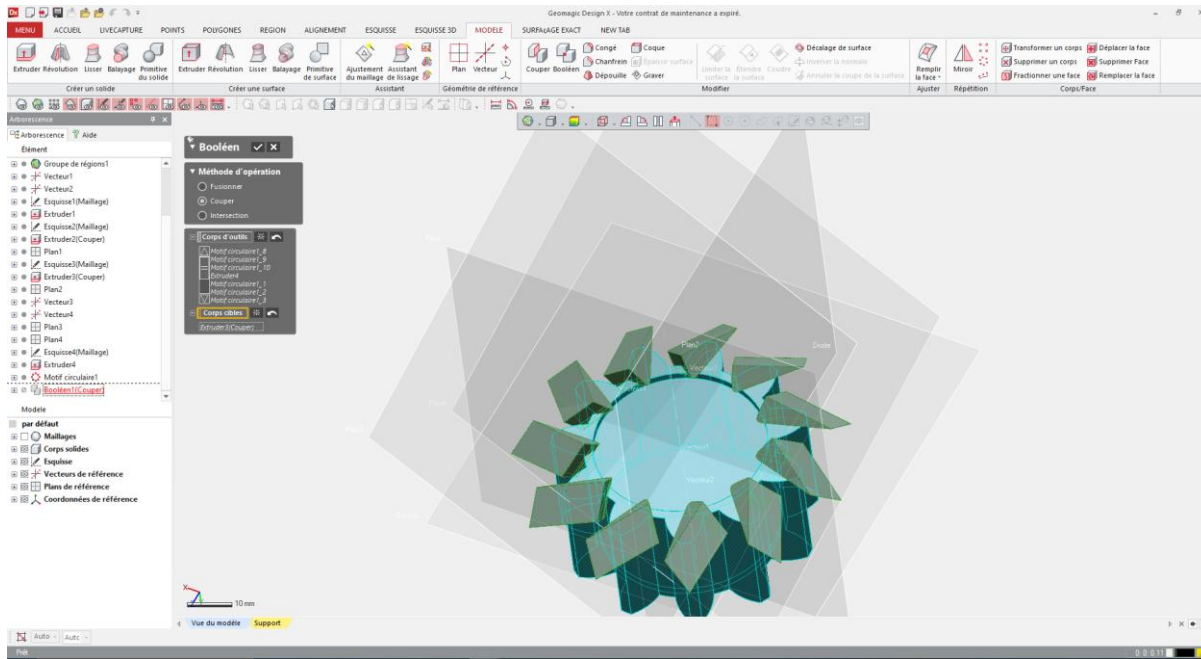


Fig 5.36 : Résultat de Booléen 1

## D- Enlèvement de la matière de l'hélice :

### a- Créer le plan 5 :

On va créer un nouveau plan au milieu de la pièce, sur **modele** sélectionner



**plan** , sur **Entités** sélectionner le **plan de dessus**, pour la **méthode** choisir **décalage**, distance = -16.5mm puis **valider** pour créer le plan 5

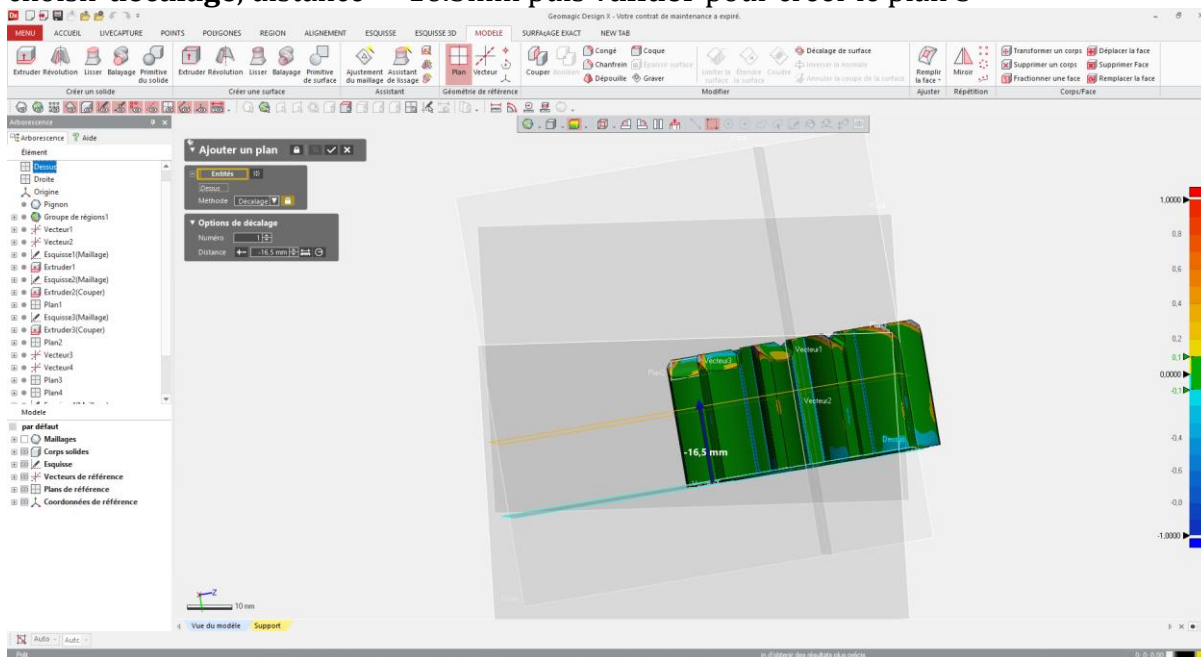


Fig 5.37 : Création de plan 5

**b- Configuration de l'esquisse de maillage 5 :**

Cliquer avec le bouton droit de la souris sur le plan 5 puis choisir **esquisse** pour la configuration de notre esquisse de maillage, laisser les paramètres standard et **valider** pour ouvrir l'esquisse

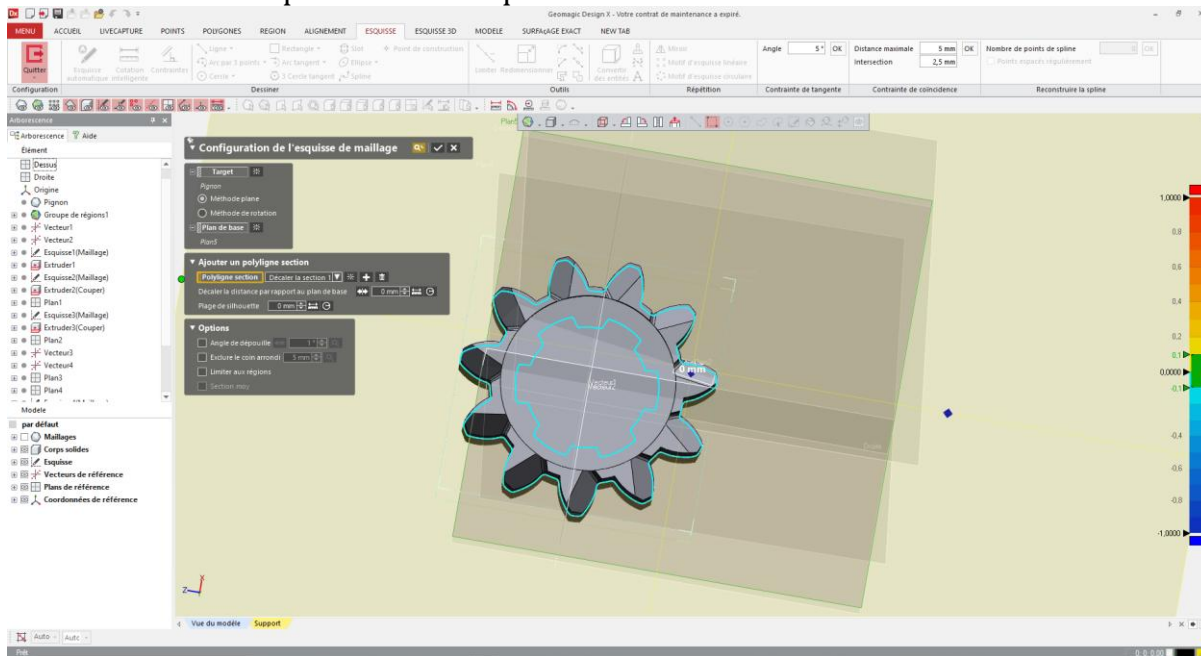

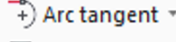

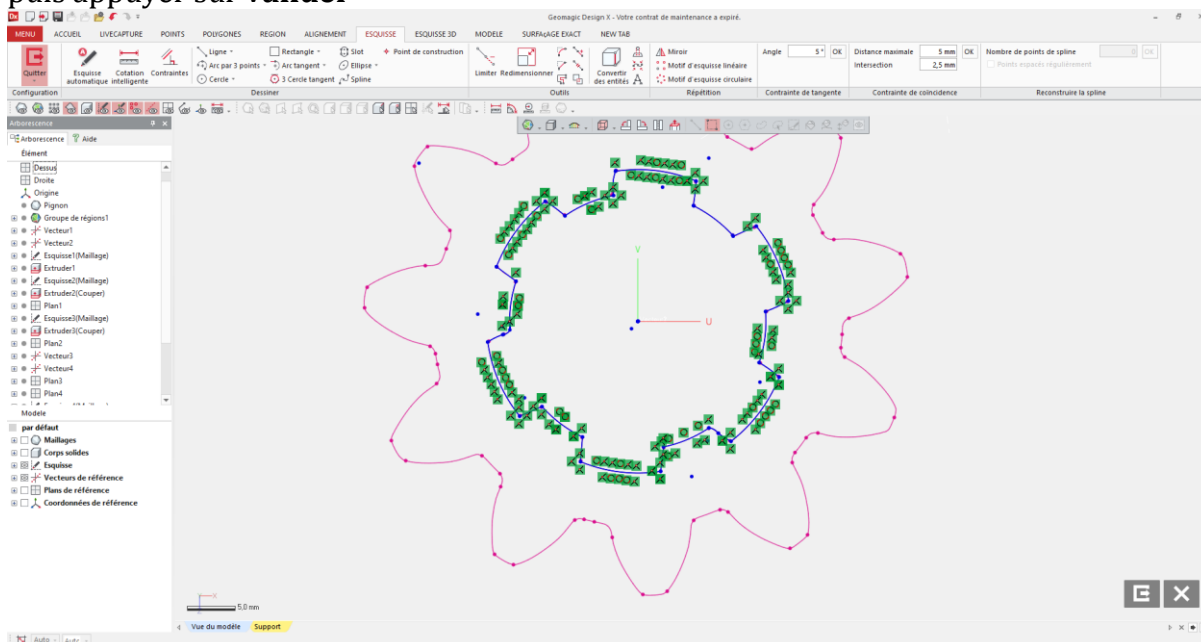


Fig 5.38 : Configuration de l'esquisse de maillage 5

**c- Dessiner l'hélice (esquisse de maillage 5) :**

Pour dessiner l'hélice on va utiliser les fonctions **cercle**  et **arc tangent**  pour dessiner la forme de l'hélice puis utiliser la

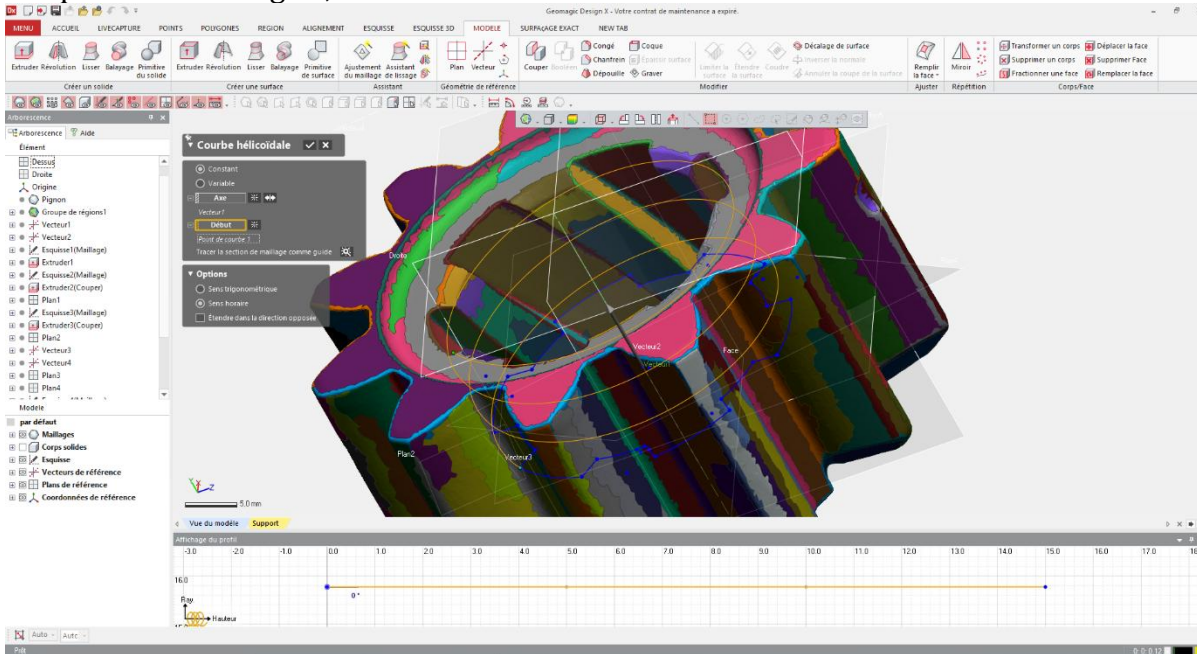
fonction **Limiter**  pour supprimer les courbes qui ne sont pas nécessaires puis appuyer sur **valider**



**Fig 5.39 : L'esquisse de maillage 5**

**d- Insérer la courbe hélicoïdale :**

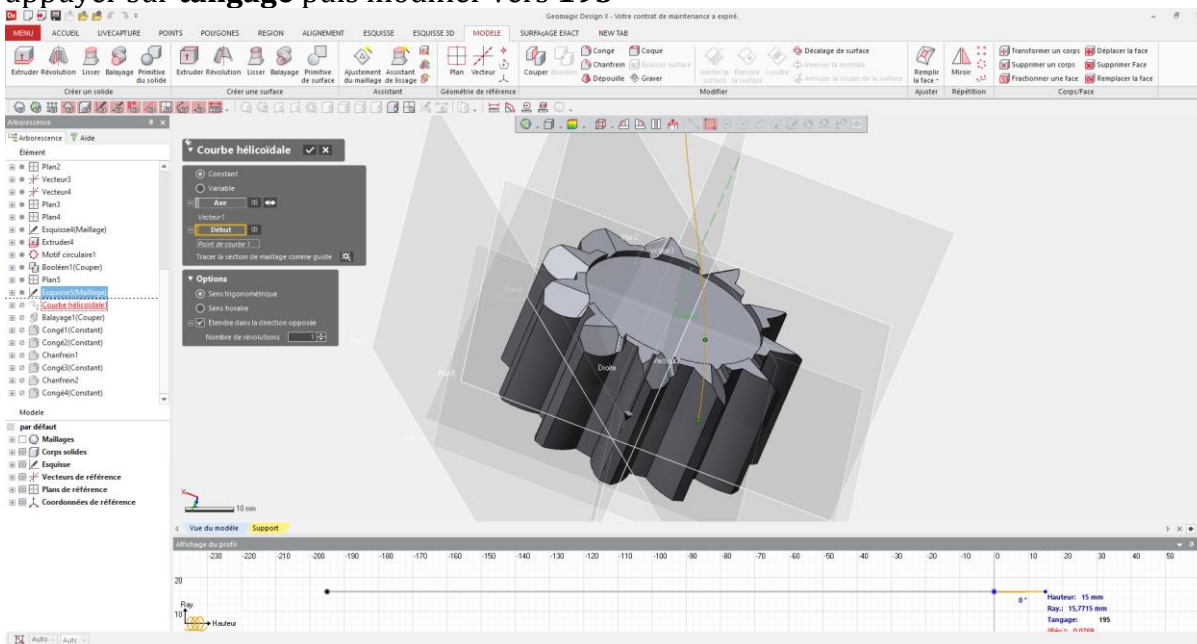
Sur **accueil** appuyer sur **insérer** puis sélectionner **hélice hélicoïdale**, pour l'**axe** sélectionner le **vecteur 1**, sur **début** sélectionner un point situé sur l'esquisse de maillage 5, choisir le **sens horaire**



**Fig 5.40 : la courbe hélicoïdale**

**e- Modifier le tangage de la courbe hélicoïdale :**

Pour modifier le tangage cliquer sur la ligne orange situé sur l'**affichage de profil**, on remarque quelques paramètres comme (hauteur, ray, tangage ...) appuyer sur **tangage** puis modifier vers **195**



**Fig 5.41 : Modification du tangage de la courbe hélicoïdale**

Puis appuyer sur **valider**

**Résultat de l'insertion de la courbe hélicoïdale :**

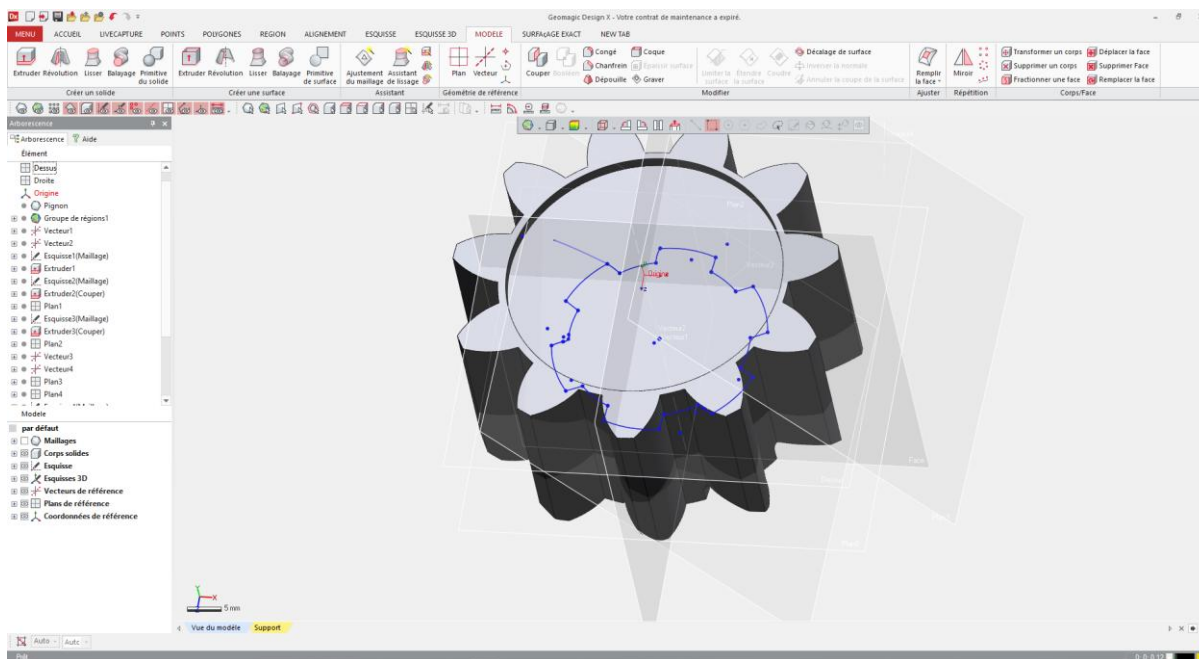
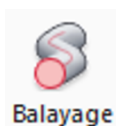


Fig 5.42 : Résultat de l'insertion de la courbe hélicoïdale

**f- Enlèvement de matière avec balayage :**



Sur **modele** appuyer sur la fonction **balayage**, pour le **profil** sélectionner l'**esquisse de maillage 5**, sur **courbe de guidage** sélectionner la **courbe hélicoïdale**, puis dans **opérateur de résultat** choisir **couper**

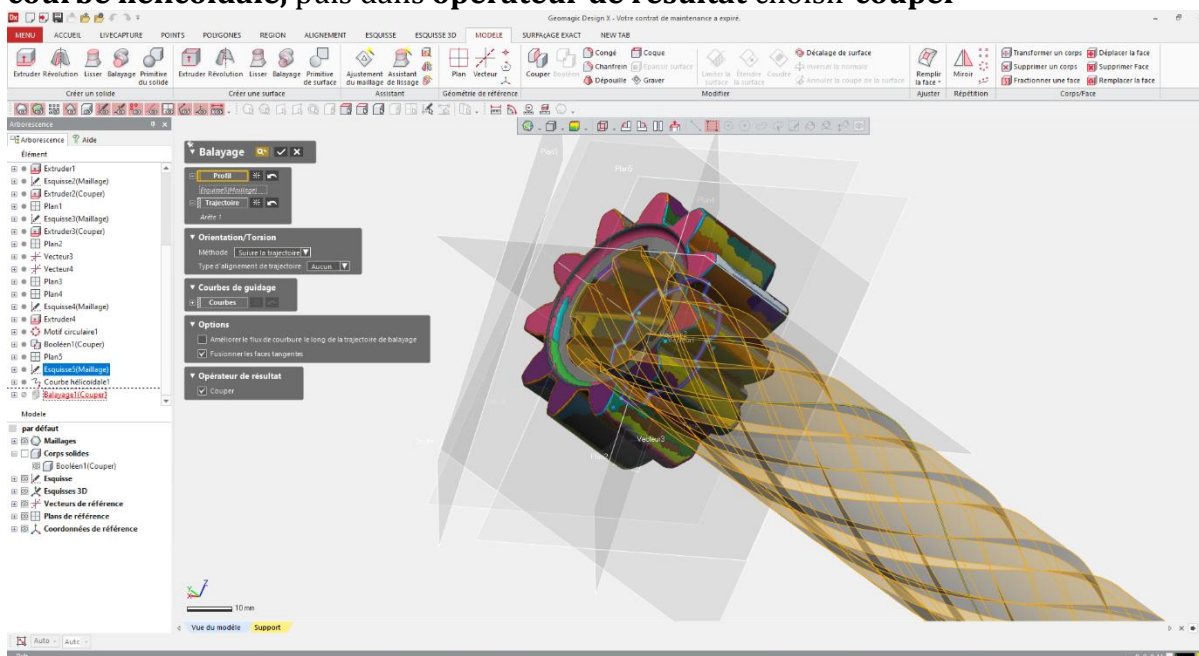


Fig 5.43 : Configuration du l'enlèvement de matière avec balayage

Puis appuyer sur **valider** pour effectuer l'opération :  
**Résultat de l'enlèvement de la matière avec balayage :**

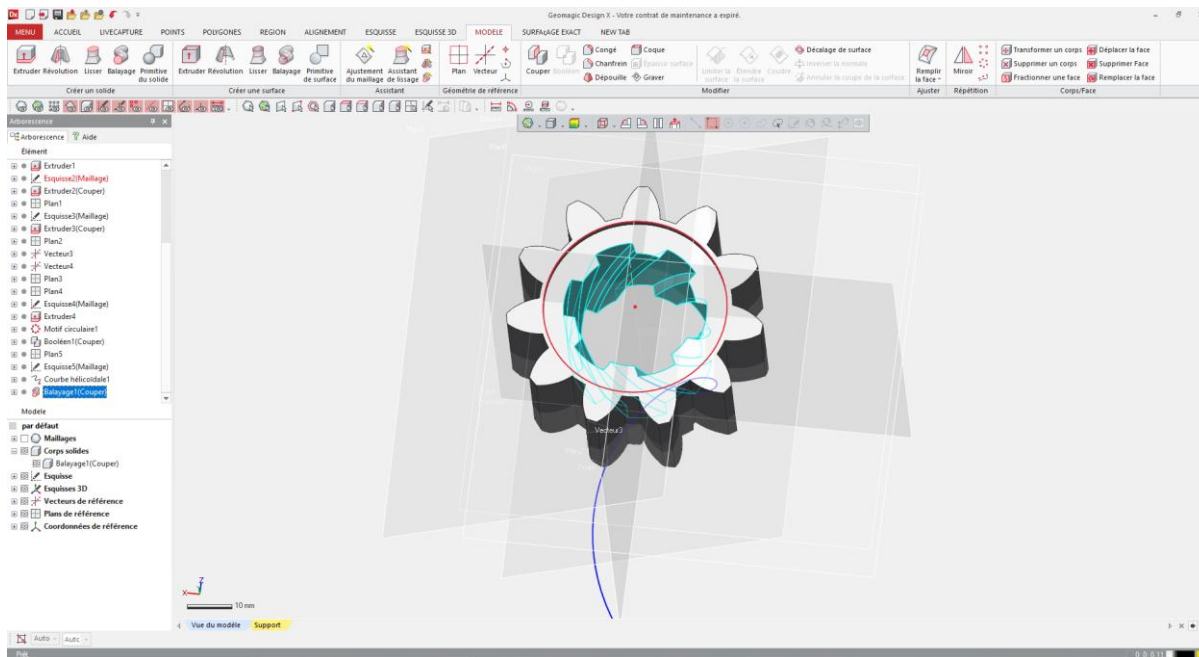



Fig 5.44 : L'enlèvement de matière avec balayage (Balayage 1)

## 6- La modification des congés et des chanfreins :

### A- Ajouter les congés :

#### a- Ajouter le congé sur le cercle supérieur :

Sur **modele** sélectionner la fonction **congé** , sur **entités** sélectionner le cercle supérieure, **rayon=2mm**

**Remarque :**  cette fonction va faire un calcul automatique de distance par rapport au corps scanné

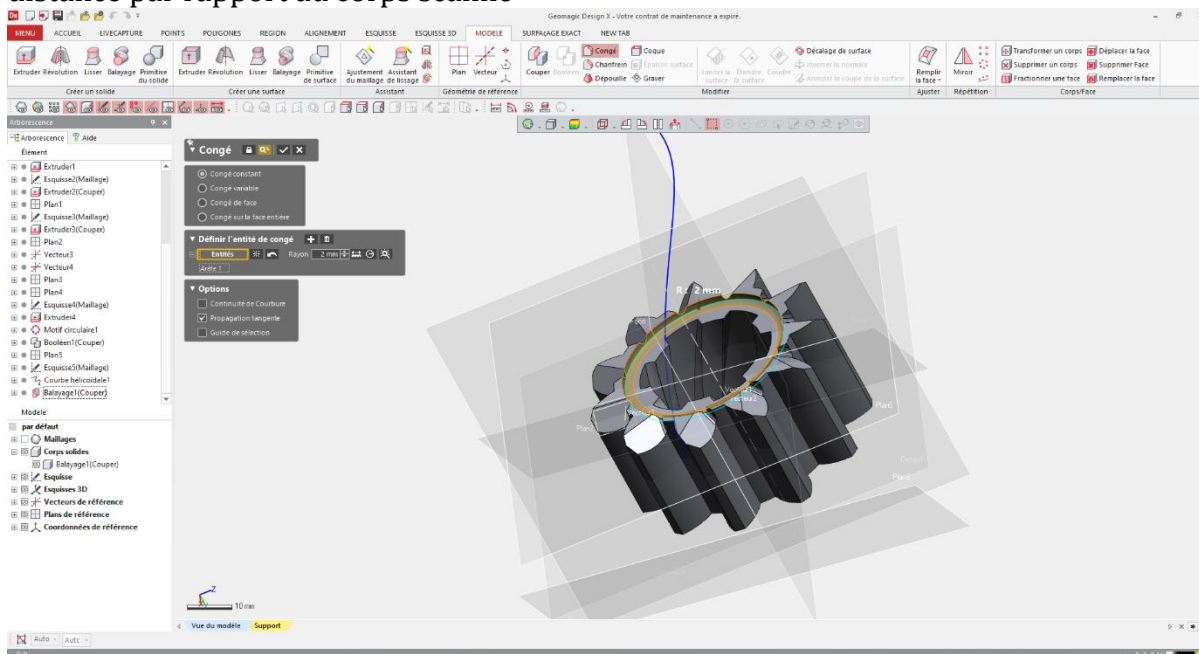
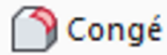


Fig 5.45 : Ajouter le congé sur le cercle supérieur

#### b- Ajouter le congé sur le cercle inférieur :



Sur **modele** sélectionner la fonction **congé** , sur **entités** sélectionner le cercle inférieur, **rayon=2mm**

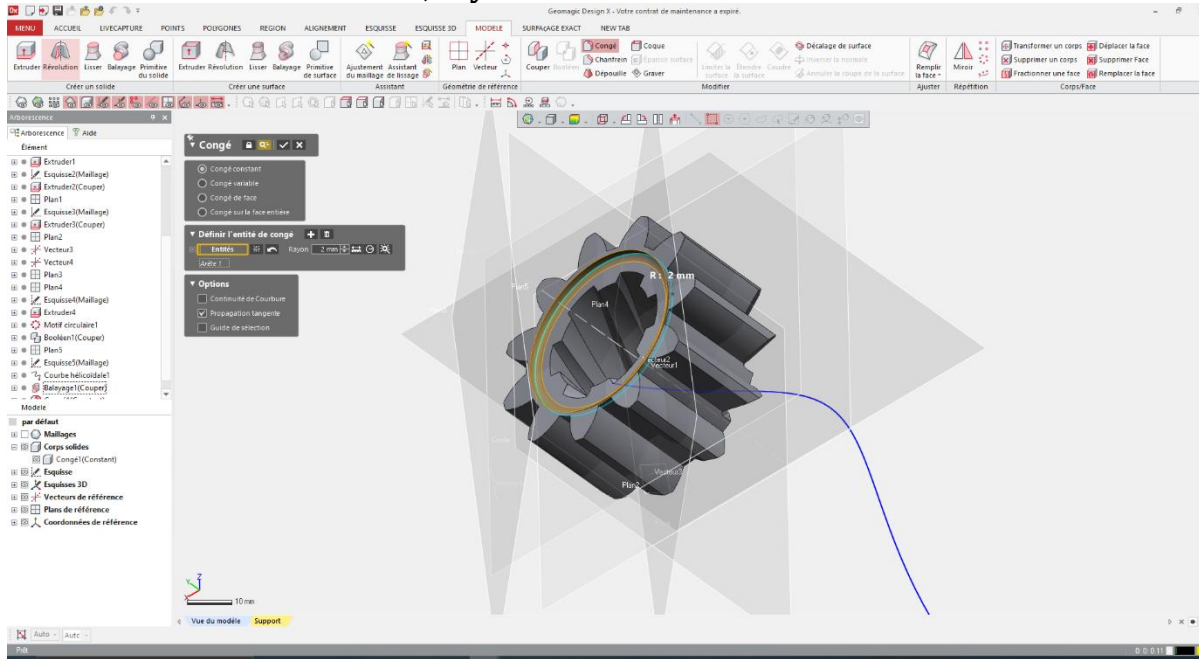
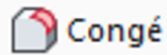


Fig 5.46 : Ajouter le congé sur le cercle inférieur

**c- Ajouter le congé sur les faces des dents :**



Sur **modele** sélectionner la fonction **congé** , sur **entités** sélectionner les arrêtes des dents montrées dans la figure sous dessus, **rayon=1.5mm**

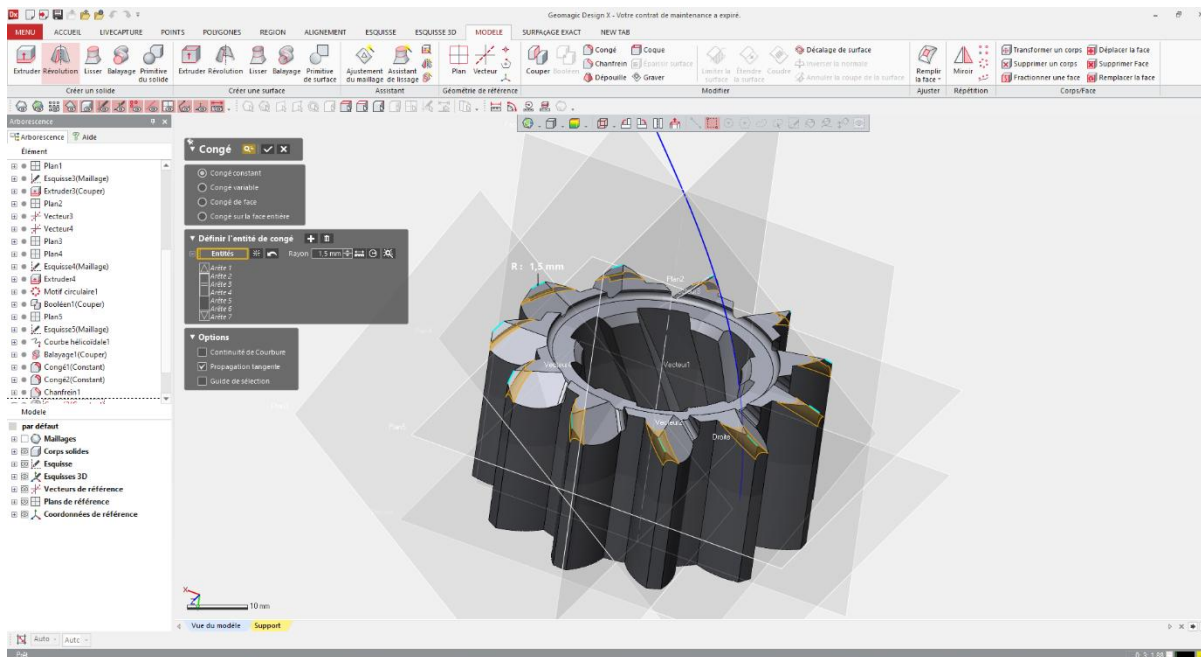
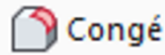


Fig 5.47 : Ajouter le congé sur les faces des dents

**d- Ajouter le congé sur les côtes des dents :**



Sur **modele** sélectionner la fonction **congé**, sur **entités** sélectionner les cotes des dents montrées dans la figure sous dessus, **rayon=1 mm**

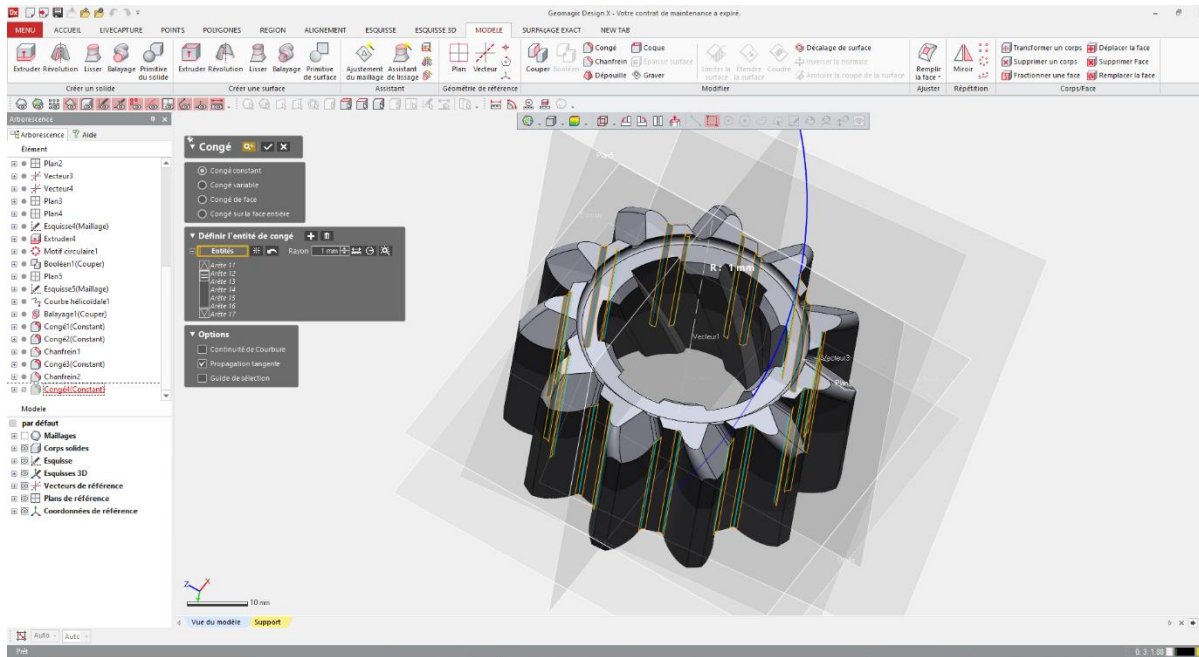


Fig 5.48 : Ajouter le congé sur les côtés des dents

## B- Ajouter les chanfreins :

### a- Ajouter les chanfreins aux bas des dents :



Sur **modele** sélectionner la fonction **chanfrein**, sur **entités** sélectionner les arrêtes des dents montrées dans la figure sous dessus, **distance=1.4mm**, **Angle= 15°**

**Remarque :** la fonction **Angle 15°** va calculer l'angle automatiquement par rapport au corps scanné

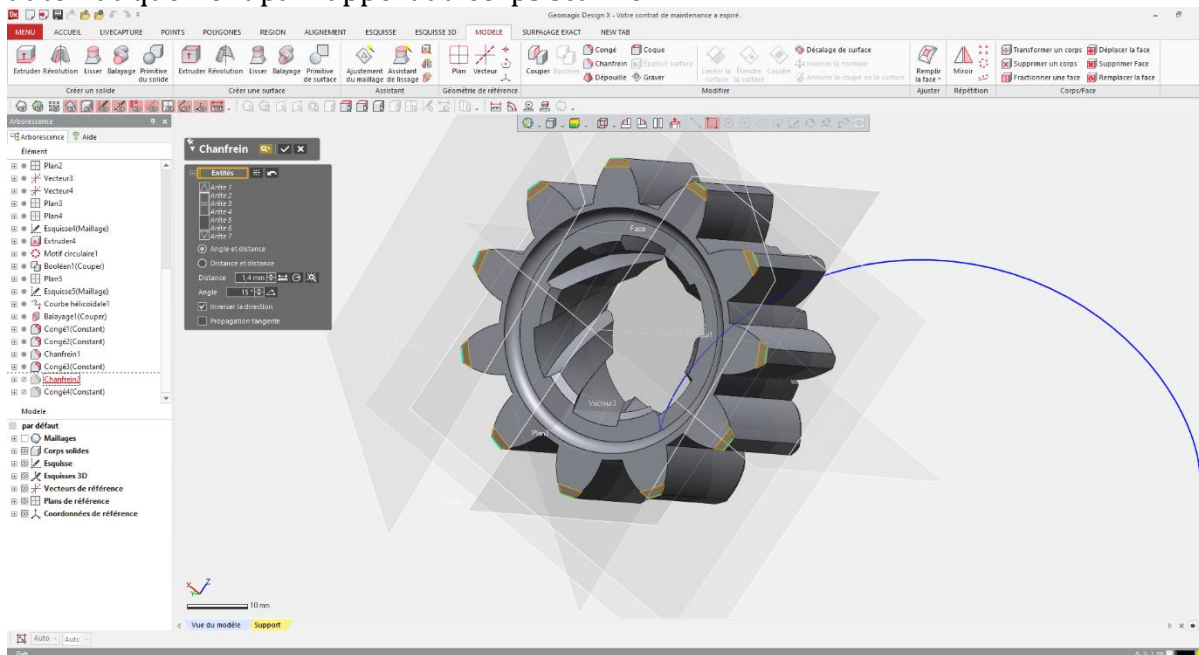
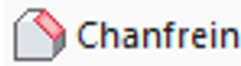
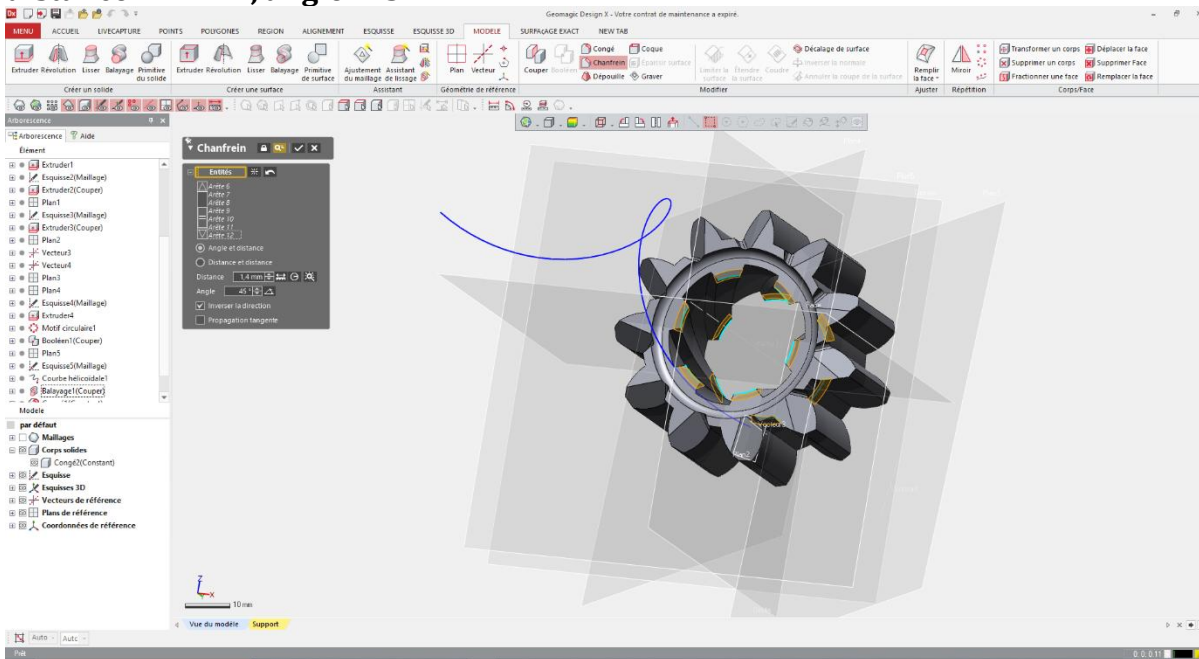


Fig 5.49 : Ajouter les chanfreins aux bas des dents

**b- Ajouter les chanfreins sur l'hélice :**

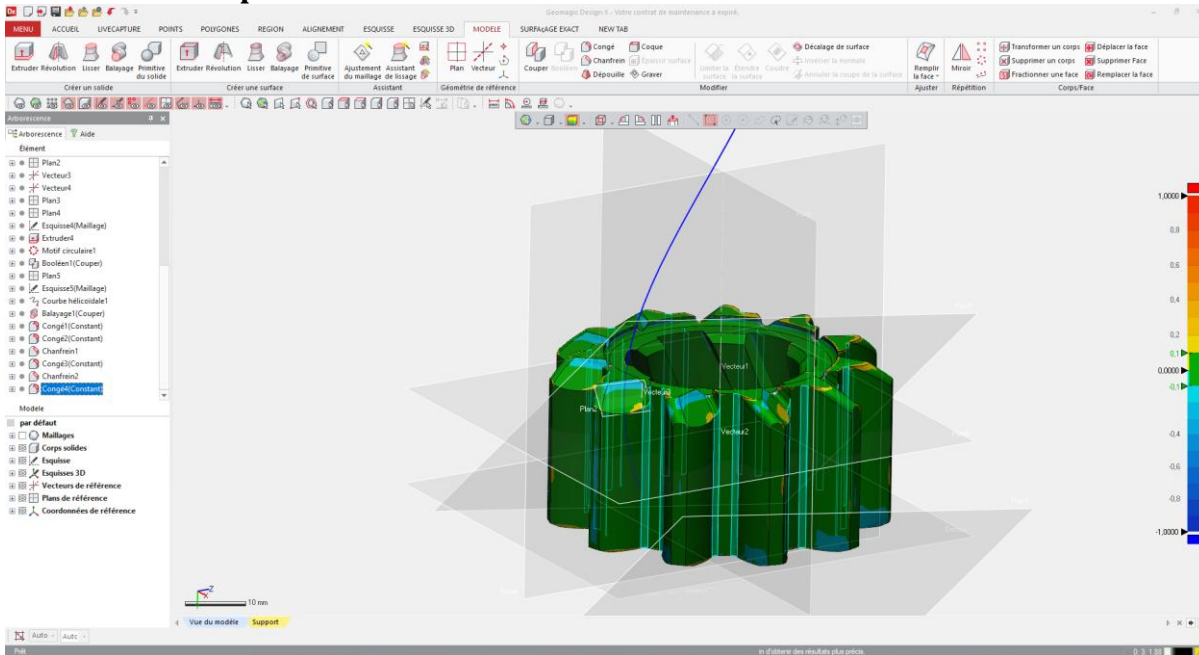


Sur **modele** sélectionner la fonction **chanfrein** sur **entités**  
sélectionner les arrêtes de l'hélice montrées dans la figure sous dessus,  
**distance=1.4mm, angle=45°**



**Fig 5.50 : Ajouter les chanfreins sur l'hélice**

**Etat finale de la pièce :**



**Fig 5.51 : Etat finale de la pièce**


**3.3.2. ETAPE 2 : Créer un pignon avec Le programme GEAR TRAX :**

Dans cette étape nous allons créer un nouveau pignon similaire au pignon qu'on a créé avec GEOMAGIC pour faire une comparaison par assemblage des

deux pignons avec SOLIDWORKS

Pour effectuer l'opération sur GEAR TRAX il faut savoir le **Nombres des dents (number of teeth)** et le **diamètre primitif (pitch diameter)**

Au début de cette opération on a mesuré le diamètre extérieure (**Outside diametre**) de modèle du pignon de GEOMAGIC (la pièce finale) avec la fonction

mesurer  = 56,882mm puis on a calculé **Pitch diametre** :

$$D=N/P$$

**D=pitch diameter (diamètre primitif)**

**N=number of teeth (nombres des dents)**

**P= diametral pitch (pas diamétral)**

$$P=N+2/OD$$

**OD=outside diametre (diamètre extérieur)**

$$P=11+2/56.8882$$

$$P=0.2285\text{mm}$$

$$P=0.2285 \times 25.4 = 5.8043\text{inch (X25.4 du mm vers inch)}$$

$$D= (11/5.8043) \times 25.4 = 48.323\text{inch}$$

$$D= 48.323\text{ Inch}$$

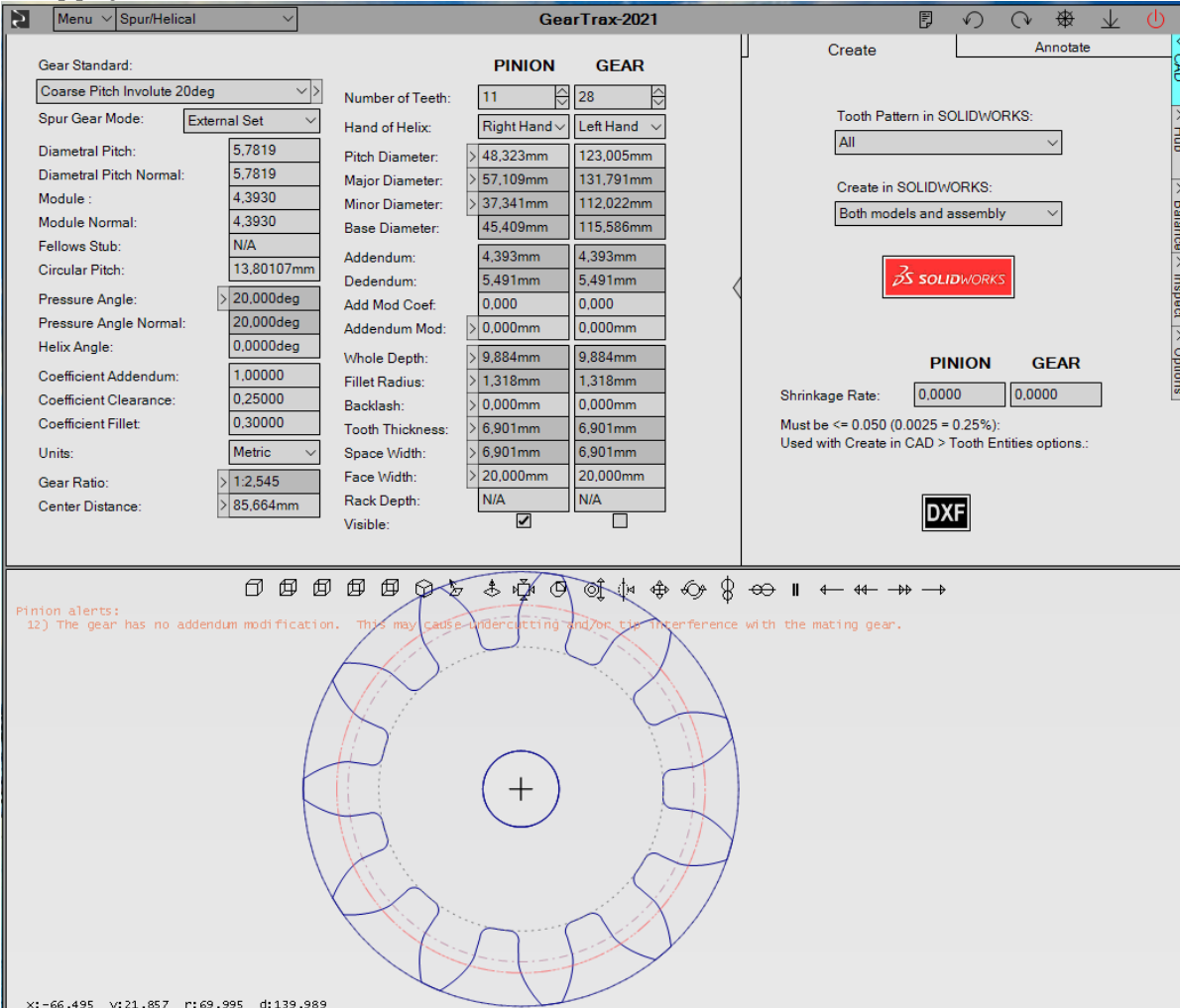
Maintenant on va ouvrir GEAR TRAX puis insérer les résultats

**Number of teeth = 11**

**Pitch diametre = 48.323 Inch**

Puis ouvrir le résultat de GEAR TRAX Sur SOLIDWORKS

en appuyant sur 



The screenshot shows the SolidWorks GearTrax-2021 interface. The left pane displays gear standards and parameters for a Spur Gear. The right pane shows the 'Create' tab with options for 'Tooth Pattern in SOLIDWORKS' (set to 'All') and 'Create in SOLIDWORKS' (set to 'Both models and assembly'). A 'Shrinkage Rate' field is set to 0.0000. A 'DXF' button is visible at the bottom of the right pane. The bottom pane shows a 3D model of a gear with a red warning message: 'Pinion alerts: 12) The gear has no addendum modification. This may cause undercutting and/or tip interference with the mating gear.'

	PINION	GEAR
Number of Teeth:	11	28
Hand of Helix:	Right Hand	Left Hand
Pitch Diameter:	48.323mm	123.005mm
Major Diameter:	57.109mm	131.791mm
Minor Diameter:	37.341mm	112.022mm
Base Diameter:	45.409mm	115.586mm
Addendum:	4.393mm	4.393mm
Dedendum:	5.491mm	5.491mm
Add Mod Coef:	0,000	0,000
Addendum Mod:	0,000mm	0,000mm
Whole Depth:	9,884mm	9,884mm
Fillet Radius:	1,318mm	1,318mm
Backlash:	0,000mm	0,000mm
Tooth Thickness:	6,901mm	6,901mm
Space Width:	6,901mm	6,901mm
Face Width:	20,000mm	20,000mm
Rack Depth:	N/A	N/A
Visible:	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Fig 5.52 : Configuration de pignon sur GEAR TRAX**

Après cette étape sauvegarder le fichier sur SOLIDWORKS

### 3.3.3. ETAPE 3 : Assemblage Des Pignons sur SOLIDWORKS :



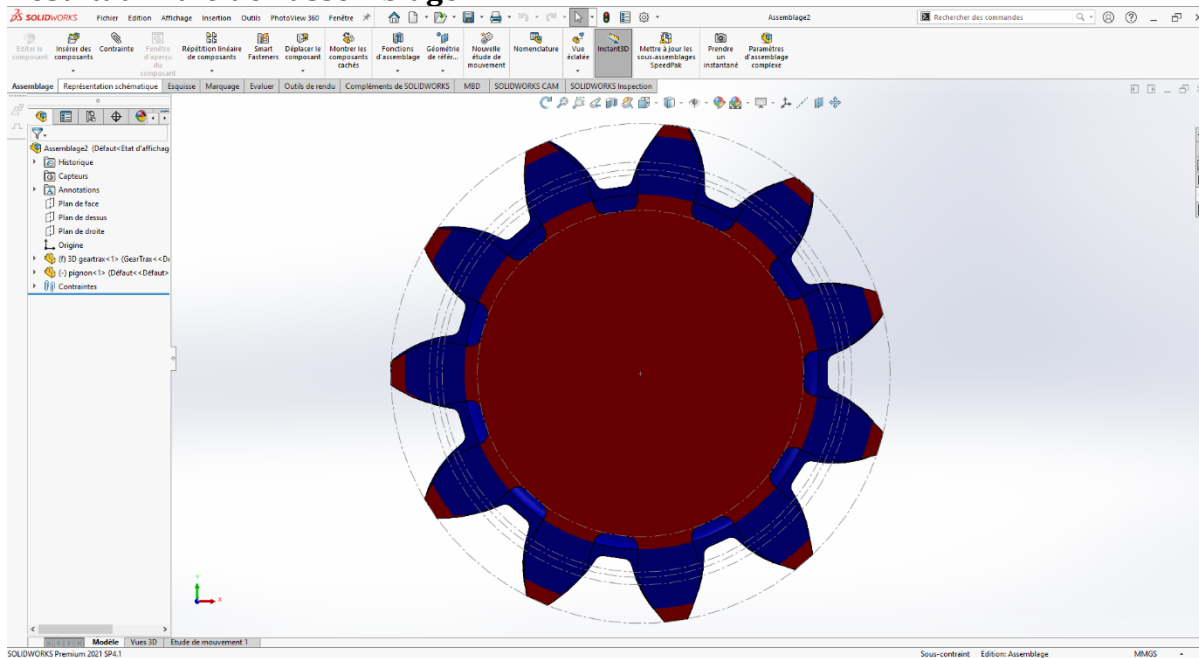
Ouvrir SOLIDWORKS puis choisir **Assemblage**, ouvrir les 2 fichiers (modèle de GEOMAGIC DESIGNX + modèle de GEARTRAX) et assembler les 2 pignons

#### Remarque :

Pignon bleu : modèle GEOMAGIC

Pignon rouge : modèle GEAR TRAX

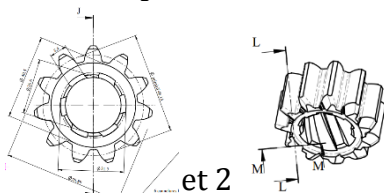
#### Résultat finale de l'assemblage :



**Fig 5.53 : Résultat du l'assemblage des pignon sur SOLIDWORKS**

### 3.3.4. ETAPE 4 : Mise en plan de la pièce :

Pour faire une mise en plan de la pièce finale créé sur GEOMAGIC DESIGN X, ouvrir le fichier sur SOLIDWORKS, appuyer sur **fichier** puis appuyer sur **créer une mise en plan à partir de la pièce**, de la même façon toute alors choisir le **gabarit mise en plan TCH007** et **valider**, cette opération va nous créer les 3 vues automatiquement (vue de face, de dessus et de droite + la vue iso) supprimer toutes les vues, sur **palette de vues** appuyer en glissant vers la



feuille sur les vues 1

et 2

Sur **disposition de vue** appuyer sur **vue en coupe** puis faire le coupe **J-J** sur les côtes de vue 1 en glissant pour faire la coupe

Fait la même opération sur la vue 2 pour faire les coupes **L-L** et **M-M**

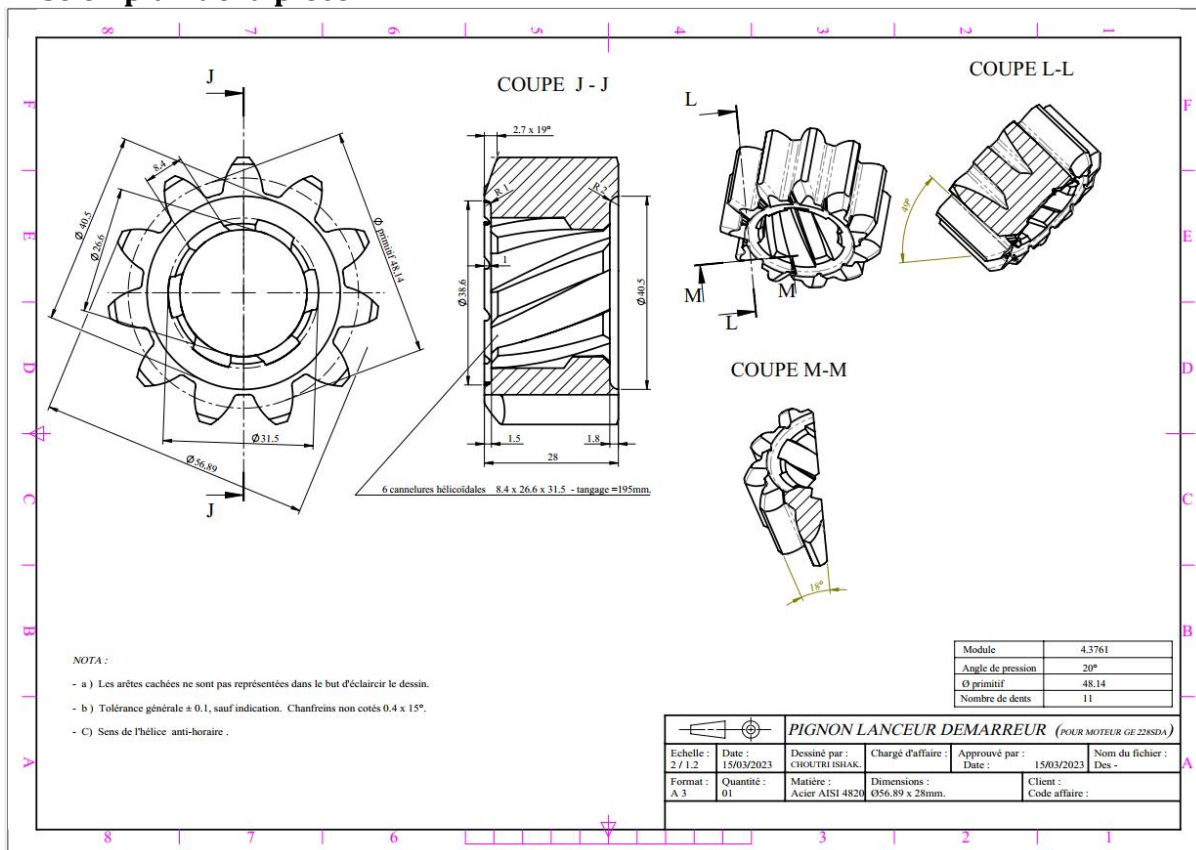
Sur **annotation** appuyer sur **cotation intelligente** pour ajouter les dimensions et les angles sur notre mise en plan



Sur annotation choisir **tables** pour créer un tableau de 4 lignes et 2 colonnes, à l'aide des informations de programme GEAR TRAX ce tableau doit contenir le module, diamètre primitif, angle de pression et nombre des dents. Ecrire quelques notes telles que : tolérance  $\pm 0.1$ , sens de l'hélice horaire, les arêtes cachées ne sont pas représentées dans le but d'éclaircir le dessin, Chanfreins non cotés  $0.4 \times 15^\circ$ .

Remplir la cartouche puis **enregistrer**

**Mise en plan de la pièce :**



**Fig 5.54 : Dessin technique de pignon sur SOLIDWORK**

### ***Conclusion générale :***

La rétro conception est une nouvelle technologie industrielle qui offre plusieurs avantages aux constructeurs telles que la construction d'une pièce malgré l'absence de son dessin technique et aussi la réduction du temps de construction, on peut la considérer comme un grand avantage commercial pour le domaine de la construction et la fabrication mécanique

Geomagic design x est le logiciel le plus puissant qui m'a aidé de réaliser la rétro conception de pignon grâce à ses outils et ses fonctions variés, aussi on trouve que le logiciel gear trax est aussi très efficace pour la construction rapide des engrenages, l'engrenage obtenu de ce logiciel est utilisé comme un moyen de comparaison

Comme perspective le geomagic design x n'est pas capable de proposer des bruts provenant des procédés de mise en forme (moulage, forgeage).

Pour cela, une méthode permettant de proposer des entités plus complexes, comme les surfaces gauches d'un brut, devraient être étudiées. En effet, dans cette thèse, on remarque que geomagic ne traite que les pièces partiellement ou entièrement usinées. Dans le cas où la pièce est partiellement usinée, c.à.d. il reste des surfaces brutes et où le brut lui-même provient de la fonderie, les surfaces brutes ont été considérées comme une seule surface

## *Bibliographie*

-[<https://www.aniwaa.fr/produit/scanners-3d/steinbichler-comet-l3d-8m/>]

-le pôle de compétitivité NOGENTECH (<http://www.cluster-nogentech.com>) de la région de Nogent (France) CHAPITRE 1 PAGE 7

-(<http://www.cluster-nogentech.com>)

-<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00260671/document>

-[(*reverse engineering - an industrial perspective* edited ; by Vinesh raja/kiran J fernandes )]

-[ Fausto Bernardini, Holly E. Rushmeier, *The 3D Model Acquisition Pipeline*, New-York, Computer Graphic Forum, Volume n°21, n°2, p.149-172,2002]

-[(en) Song Zhang, Peisen Huang, *High-resolution, real-time 3-D shape*]

-(2004). *Confrontation du relevé laser 3D aux techniques de relevé conventionnelles et de développement d'outils numériques pour la restitution architecturale*. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection, Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 2004, pp.36-47. halshs-00260671

-Bille, Rolland (2015). *Le point sur les techniques de levé*. Paper presented at «Des levés, pourquoi ?» Levés et représentations du patrimoine, le visible et l'invisible, Namur, Belgique, <http://hdl.handle.net/2268/189016>

-« Search Rockwell Automation » [archive], sur [www.rockwellautomation.com](http://www.rockwellautomation.com) (consulté le 6 décembre 2022)

-Dr M. Bouri LSRO, « *BASES DE LA ROBOTIQUE* » [archive] [PDF], sur [moodlearchive.epfl.ch](http://moodlearchive.epfl.ch), octobre 2018, p. 48

-["3D Systems Completes the Acquisition of Geomagic". 2013-02-27]

-[Data Sheet GearTrax (updated 11/23/2021)]

-[ « SOLIDWORKS 2022 SP1 Release Notes » [archive], novembre 2021 (consulté le 2 février 2022)]

-Abella, R.J., Daschbach, J.M., & McNichols, R.J. 1994. Reverse engineering industrial applications. *Computers & Industrial Engineering*, 26(2), 381-385.

-Bagci, E. 2009. Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies. *Advances in Engineering Software*, 40(6), 407-418

-Bernard, A., Laroche, F., Ammar-Khodja, S., & Perry, N. 2007. Impact of New 3D Numerical Devices and Environments on Redesign and Valorisation of Mechanical Systems.

{CIRP} *Annals - Manufacturing Technology*, 56(1), 143-148.

-Durupt, A. 2010. Définition d'un processus de rétro-conception de produit par intégration des connaissances de son cycle de vie. Ph.D. thesis, Université de Technologie de Troyes.

-Xia, Z. 2014. Application of Reverse Engineering based on Computer in Product Design.

*International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 9(5), 343354.

-Nartz, O., Bernard, A., Ris, G., & Remy, S. 2002. De l'objet À l'objet : rétro-conception d'un bouchon de radiateur de Delahaye 135. In : *Proceedings of the European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*.

-Urbanic, R.J., ElMaraghy, H.A., & ElMaraghy, W.H. 2008. A reverse engineering methodology for rotary components from point cloud data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(11-12), 11461167.

-VPERI. 2003. Army research on virtual parts engineering research initiative.

<http://www.cs.utah.edu/gdc/Viper/Collaborations/VPERI-Final-Report.pdf>.

-Fuchs, Alain ; Alby, Emmanuel ; Begriche, Réda ; Grussenmeyer, Pierre ; Perrin, Jean-Pierre (2004).

*Confrontation du relevé laser 3D aux techniques de relevé conventionnelles et de développement d'outils numériques pour la restitution architecturale*. *Revue Française de*

*Photogrammétrie et de Télédétection*, Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection, 2004, pp.36-47. halshs-00260671

<https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00260671/document>

-Héno, Raphaële ; Chandelier, Laure (2014). *Numérisation 3D de bâtiments, Cas des édifices remarquables*. Collection SIG et intelligence territoriale, Ed. ISTE Group, p.82-84

-Bille, Rolland (2015). *Le point sur les techniques de levé*. Paper presented at «Des levés, pourquoi ?» Levés et représentations du patrimoine, le visible et l'invisible, Namur, Belgique,

<http://hdl.handle.net/2268/189016>

-Dubois, Samuel ; Vanhellefont, Yves ; de Bouw, Michael (2017). *Le relevé géométrique à haute définition: la numérisation 3D à l'heure du BIM*. Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC), Innovation Paper

[https://www.cstc.be/homepage/download.cfm?lang=fr&dtype=innov\\_support&doc=InnovationPaper\\_Scanning\\_FR.pdf](https://www.cstc.be/homepage/download.cfm?lang=fr&dtype=innov_support&doc=InnovationPaper_Scanning_FR.pdf)

-Magri-Djenane, Sahar ; Madhoui, Meriem ; Belarbi, Samia (2011-2012). *Cours : Technique du relevé architectural*. Université Mohamed Khider Biskra, Département d'architecture, p.3-11

-Carrieri, Fabrice (2019). *Formation OBS « Scan 3D et autres technologies numériques »*. Pôle de la Pierre à Soignies, 5 décembre

-Yau H, Haque S, Menq C (1993) Reverse engineering in the design of engine intake and exhausts ports. *Manuf Sci Eng*, 64:139–148

-Motavalli S, Shamsaasef R (1996) Object-oriented modelling of a feature based reverse engineering system. *Int J Comp Integ M* 9(5):354–368

## *Résumé*

La rétroconception est une activité qui est utilisée dans l'industrie manufacturière dans le but de générer des modèles 3D d'artéfacts analysés pour la refabrication. Elle est basée sur l'utilisation des informations relatives à la géométrie du produit récupérées à travers la digitalisation de sa géométrie en utilisant des technologies de scan 3D qui sont multiples, en prend comme exemple le scanner laser, photogrammétrie, MMT, de palpation, ou autres. Cependant, un artéfact ne se limite pas qu'à son enveloppe externe. En effet, plusieurs aspects peuvent être utilisés pour décrire le produit.

Ma thèse propose la retro conception d'un pignon de démarreur du moteur général Electric , à l'aide du scannaire STEINBICHLER COMET L3D qui utilise la technologie de numérisation 3D à lumière structurée par LED bleue, on a réussi d'obtenir un fichier scan puis on a fait la rétro conception sur le programme Geomagic Design X qui est l'un des programmes les plus puissants et le plus utilisés dans ce domaine de RC ,dans ce logiciel on a importé le fichier scan puis on a passé par les étapes de la retro conception, le principe de ces étapes repose sur l'acquisition d'un nuage de points à partir de la surface de la pièce à numériser. Ce nuage de points est traité par Geomagic design x qui crée d'abord un modèle polygonal (utilisé dans l'usinage, la simulation et le prototypage rapide), puis génère des surfaces NURBS (acronyme pour : non-uniform rational basis spline). Une pièce définie numériquement qui est exportée vers la CAO peut être modifiée et ajustée pour une utilisation ultérieure. Puis nous avons créé un nouveau pignon similaire au pignon créé avec GEOMAGIC DESIGN X à l'aide du programme **GEAR TRAX**, encore faire l'assemblage du modèle du pignon de GEOMAGIC DESIGN X avec le modèle du pignon de GEAR TRAX pour faire une comparaison entre les deux corps, cette opération a été effectuée sur **SOLIDWORKS** et finalement le dessin technique de la pièce (pignon) sur **SOLIDWORKS**

## ***Abstract***

Reverse engineering is an activity that is used in the manufacturing industry to generate 3D models of analyzed artifacts, which are typically used for remanufacturing. For this, reverse engineering is based on the use of information relating to the shape of the product (geometry) recovered through the digitization of its geometry using multiple 3D scanning technologies, taking as an example the laser scanner, photogrammetry, CMM, palpation, or others. However, an artifact is not limited to its outer shell. Indeed, several aspects can be used to describe the product.

This thesis proposes the retro design of a starter pinion of the General Electric engine, using a STEINBICHLER COMET L3D scanner which uses 3D scanning technology with structured light by blue LED, we succeeded in obtaining a scan file then we did the reverse design on the Geomagic Design X program which is one of the most powerful programs and used in this field of RC, in this software we imported the scan file then we went through the stages of the reverse design, the principle of these steps is based on the acquisition of a cloud of points from the surface of the part to be digitized. This point cloud is processed by a Geomagic design x which first creates a polygonal model (used in machining, simulation and rapid prototyping), then generates NURBS surfaces (acronym for: non-uniform rational basis spline). A digitally defined part that is exported to CAD can be edited and adjusted for later use. Then we created a new pinion similar to the pinion created with GEOMAGIC DESIGN X using the GEAR TRAX program, again assembling the GEOMAGIC DESIGN X pinion model with the GEAR TRAX pinion model to make a comparison between both bodies, this operation was done on SOLIDWORKS and finally the technical drawing of the part (pinion) on SOLIDWORKS

## ملخص

الهندسة العكسية هي نشاط يتم استخدامه في الصناعة التحويلية لإنشاء نماذج ثلاثية الأبعاد للقطع الأثرية التي تم تحليلها لإعادة التصنيع. يعتمد على استخدام المعلومات المتعلقة بهندسة المنتج المسترجع من خلال رقمنة هندسته باستخدام تقنيات مسح ضوئي ثلاثية الأبعاد متعددة ، مع الأخذ على سبيل المثال الماسح الضوئي بالليزر ، أو المسح التصويري ، أو MMT ، أو الجس ، أو غير ذلك. ومع ذلك ، فإن القطعة الأثرية لا تقتصر على غلافها الخارجي. في الواقع ، يمكن استخدام عدة جوانب لوصف المنتج.

تقترح رسالتي التصميم العكسي لترس بداية لمحرك جنرال إلكتريك ، باستخدام الماسح الضوئي STEINBICHLER COMET L3D الذي يستخدم تقنية المسح ثلاثي الأبعاد مع الضوء المنظم بواسطة مصابيح LED الزرقاء ، وتمكنا من الحصول على ملف مسح ضوئي ، ثم قمنا بالتصميم العكسي على برنامج Geomagic Design X وهو من أقوى البرامج وأكثرها استخداماً في هذا المجال ، في هذا البرنامج قمنا باستيراد ملف المسح ثم مررنا بخطوات التصميم العكسي ، ومبدأ هذه الخطوات يقوم على الحصول على سحابة من النقاط من سطح الجزء المراد رقمته. تتم معالجة سحابة النقاط هذه بواسطة Geomagic design x الذي ينشئ أولاً نموذجاً متعدد الأضلاع (يستخدم في المعالجة الآلية والمحاكاة والنماذج الأولية السريعة) ، ثم يولد أسطح NURBS (اختصار لـ: خدد أساس منطقي غير منتظم). يمكن تحرير جزء معرف رقمياً يتم تصديره إلى CAD وتعديله للاستخدام لاحقاً. ثم أنشأنا ترساً جديداً مشابهاً للترس الصغير الذي تم إنشاؤه باستخدام GEOMAGIC DESIGN X وذلك باستخدام برنامج GEAR TRAX ، وقمنا مرة أخرى بتجميع طراز GEOMAGIC DESIGN X pinion مع طراز GEAR TRAX الصغير لإجراء مقارنة بين كلا الهيئتين ، وتم إجراء هذه العملية على SOLIDWORKS و أخيراً الرسم الفني للجزء (ترس صغير) على SOLIDWORKS

