



UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



MEMOIRE de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

Domaine : Sciences et technologie

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Construction mécanique

Par : - BOUROUIS Abdelwadoud
- TABI Kanza

SUJET

**Contrôle géométrique sur machine à mesurer
tridimensionnelle (MMT) des pièces fabriquées par
impression 3D et CNC.**

Soutenu publiquement le : 25/06/2025 devant le jury composé de :

Pr. AMROUNE Salah

Université de M'sila

Encadreur

Pr. ZAOUI Moussa

Université de M'sila

Président

Pr. SLAMANI Mohamed

Université de M'sila

Examineur

Promotion : 2024 / 2025

Remerciement

C'est un grand honneur pour nous d'avoir l'opportunité de collaborer avec le professeur Amroune Salah et nous lui sommes vraiment reconnaissants pour ses précieux témoignages, le temps qu'il a consacré à nos mémoires, ainsi que ses vastes connaissances et l'aide précieuse qu'il nous a apportée. Tout au long du développement de cette thèse, son expertise, ses conseils judicieux et son soutien continu nous ont grandement aidés et nous lui en sommes profondément reconnaissants. Nous tenons également à exprimer notre sincère gratitude à nos familles, qui ont toujours été à nos côtés et ont cru en nous et en nos capacités. Leur présence et leurs encouragements nous ont donné la force de continuer même dans les moments difficiles. Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail, et en particulier Monsieur Amroun Saleh. Merci à tout

Dédicaces

Nous dédions notre modeste mémoire de fin d'études à nos parents, BOUROUIS Ali / AISSOU Zahia, et TABI Boulanouar / TAYOUB Rebah, TABI Mohamed qui ont toujours été à nos côtés.

Nous adressons également nos sincères à La ben JEDDOU Ahmed et à la responsable du département de production, OUADADA Kamal, qui nous ont facilité la tâche et nous ont été d'une grande aide.

À M. ARSLEN Mustafa pour sa patience et à M. ZAOUI Moussa.

Nous dédions également ce souvenir à tous les enseignants qui nous ont soutenus. Un grand merci à eux.

Résumé :

Ce mémoire a pour objectif principal de promouvoir l'utilisation efficace de la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), afin de faciliter son intégration dans les projets futurs des étudiants en génie mécanique. Il est en effet important de souligner que la MMT n'avait encore jamais été exploitée dans le cadre des projets étudiants et même pour les travaux pratique, et que ce travail constitue une première démarche concrète dans cette direction. Dans ce contexte, ce mémoire porte sur l'analyse géométrique comparative de pièces réalisées par impression 3D et par usinage CNC, en utilisant la MMT comme principal outil d'inspection.

Avant d'entamer de mesure, la fiabilité de la machine a été vérifiée à l'aide d'une pièce de référence en aluminium, mesurée à quatre reprises. Les résultats ont démontré une bonne stabilité et une reproductibilité satisfaisante, garantissant ainsi la fiabilité de l'appareil.

La seconde phase du projet a consisté à mesurer et comparer les pièces issues des deux procédés de fabrication. Les résultats obtenus indiquent que l'usinage CNC offre une précision géométrique supérieure, tandis que les pièces issues de l'impression 3D présentent des écarts plus marqués par rapport aux dimensions nominales. Cette étude met en évidence l'importance des mesures tridimensionnelles pour orienter le choix d'un procédé de fabrication et en valider la qualité, tout en soulignant les avantages et les limites de chaque méthode en matière de précision.

Abstract:

The main objective of this memory is to enable the effective use of the coordinate measuring machine (CMM), with the aim of promoting its integration into future projects carried out by mechanical engineering students. It is important to note that the CMM had never been used before in student projects and practical work, and this work represents the first concrete step in that direction.

In this context, the memory focuses on a comparative geometric analysis of parts manufactured using 3D printing and CNC machining, with the CMM used as the primary inspection tool.

Before beginning the measurement campaigns, the reliability of the machine was verified using a reference aluminum part, which was measured four times. The results demonstrated good stability and satisfactory repeatability, thus ensuring the reliability of the device.

The second phase of the project involved measuring and comparing the parts produced by the two manufacturing processes. The results indicate that CNC machining provides higher geometric accuracy, whereas the 3D-printed parts show greater deviations from the nominal dimensions. This study highlights the importance of 3D measurements in guiding the choice of a manufacturing process and validating its quality, while also pointing out the advantages and limitations of each method in terms of precision.

ملخص بالعربية:

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تمكين الاستخدام الفعال لالة القياس ثلاثية الابعاد , بهدف تعزيز ادماجها في المشاريع المستقبلية لطلبة الهندسة الميكانيكية. ومن المهم الاشارة الى ان الة القياس لم تكن قد استخدمت من قبل في اطار مشاريع الطلبة, ويعد هذا العمل خطوة اولى ملموسة في هذا الاتجاه.

وفي هذا السياق, يتناول هذا البحث تحليلا هندسيا مقارنا لقطع تم تصنيعها بتقنيتي الطباعة ثلاثية الابعاد و التصنيع باستخدام الة التحكم الرقمي, مع اعتماد الة القياس ثلاثية الابعاد كاداة رئيسية للفحص.

وقبل الشروع في مراحل القياس, تم التحقق من موثوقية الجهاز باستخدام قطعة مرجعية مصنوعة من الالمنيوم, تم قياسها اربعة مرات, وقد أظهرت النتائج استقرار جيدا وقابلية التكرار مرضي, مما يضمن موثوقية الجهاز. اما المرحلة الثانية من المشروع, فقد تمثلت في قياس و مقارنة القطع الناتجة عن الطريقتين في التصنيع. وقد أظهرت النتائج ان التصنيع باستخدام الة التحكم الرقمي يوفر دقة هندسية اعلى, في حين ان القطعة الناتجة عن الطباعة ثلاثية الابعاد تظهر انحرافات أكبر عن الابعاد الحقيقية. وتبرز هذه الدراسة أهمية القياسات ثلاثية الأبعاد في توجيه اختيار عملية التصنيع و التحقق من جودتها, مع تسليط الضوء على مزايا وقيود كل طريقة من حيث الدقة.

Sommaires

Résumé

Abstract

ملخص

Introduction générale

Chapitre I

Introduction	14
2- Historiques et évolution	15
3- Composante de machine MMT	15
3.1 Structure de la MMT	15
3.2 Système de guidage et de déplacement	15
3.3 System de Palpage	16
3.3.1 Généralités	16
3.3.2 Principe de fonctionnement de system palpage	17
3.3.3 Etalonnage des palpeurs	17
3.3.4 Type de palpeur	19
1. Palpeur de contact	19
2. Palpeur optique	19
3. Palpeur déclencheur	20
4. Palpeur à scanner	20
4- Système de collecte et de mesure des données	20
5- Accessoires et options	20
6- Principe et fonctionnement des MMT	21
7- Structures des machines à mesurer tridimensionnelles	22
8- Analyse d'une mesure sous Machine à Mesurer Tridimensionnelle	24
8.1 Sources de perturbation d'une Machine à Mesurer Tridimensionnelle	24
8.2 Amélioration de la qualité des machines	25
8.3 Amélioration de la qualité des mesures	26
9- Erreur de mesure et incertitude sur la mesure	26
10- Applications industriels	27
1. Contrôle Qualité et Inspection	27
2. Aéronautique et Aérospatiale	27

3.	Industrie Automobile	28
4.	Fabrication de Dispositifs Médicaux	28
5.	Électronique	29
6.	Mécanique Générale et de Précision.....	29
7.	Énergie	29
8.	Rétro-ingénierie (Reverse Engineering)	30
9.	Assemblage et Ajustement.....	30
10.	Validation de Prototype	30
	Conclusion.....	30

Chapitre II

	Introduction	33
	1- Historique.....	34
	2- Définition	36
	3- Principe de fonctionnement d'une imprimante 3D	37
	4- Les différents types d'impression en 3D	39
	4.1 Le dépôt de filament fondu	39
	4.2 La stéréo lithographie (SLA).....	40
	4.3 Le frittage laser (SLS).....	41
	4.4 Le procédé poly jet	41
	4.5 Le procédé DLP	42
	5- Le composant d'imprimante 3D	43
	Extrudeuse :	44
	1. Zone chaude	44
	2. Zone froide.....	44
	3. La zone de transition.....	44
	1. Moteur pas à pas	45
	2. Buses à pas doux.....	45
	3. Bloc chauffant progressif	46
	4. Guide pas à pas	46
	5. Résistance pas à pas	46
	6. Ventilateur pas à pas	46
	7. Radiateur pas à pas.....	47
	8. Pignon moteur pas à pas	47

9. Palier à gradins.....	47
6- Les matériaux utilisés dans l'impression	47
6.1 PLA (Acide poly lactique)	47
6.2 ABS (acrylonitrile butadiène styrène).....	47
6.3 La poudre de polyamide	48
6.4 La poudre d'alumide	48
6.5 La résine liquide	48
6.6 Le titane.....	49
6.7 L'aluminium.....	49
6.8 Le bois	49
6.9 Le béton.....	50
7 Les domaines d'application de la technique d'impression 3d	50
7.1 Le domaine médical	50
7.2 Domaine d'aéronautique et aérospatiale	51
7.3 Domaine d'automobile	52
7.4 Domaine alimentaire	52
7.5 Domaine d'architecture	53
Conclusion.....	54

Chapitre III

1. Conception de pièce à l'aide du logiciel CATIA	56
2- impression 3D à l'aide du logiciel CURA	59
3- Fabrication de la pièce en aluminium	62
3.1 Explication détaillée du G-code utilisé pour l'usinage CNC d'une pièce en aluminium.....	68
3.1.1. Définition du brut (commande WORKPIECE).....	68
3.1.2. Configuration du système de travail.....	68
3.1.3 Sélection de l'outil et configuration de la broche	68
3.1.4. Exécution des cycles automatisés.....	68
3.1.5. Déplacement et usinage linéaire.....	69
3.1.6. Usinage de poches (commande POCKET4)	69
3.1.7. Génération de bossages (formes en relief)	69
3.1.8. Usinage circulaire (commande G3).....	69
3.1.9. Structure logique du programme.....	69

3.1.10. Fin du programme	70
3.2 Processus de fabrication sur CNC.....	70
4- contrôle de la pièce par la machine a mesuré tridimensionnelle	71
5. Calcule des dimensions	72
1- Allumez l'appareil	72
2- Préparation de la tête de mesure (probe).....	72
3- fixe la pièce dans la table	72
4- Définir le système de coordonnées :	72
4.1-Systèmes de coordonnées :	72
4.1.1 - Réglez le programme de mesure en appuyant sur les touches suivantes	72
4.1.2 - Préparez la tête de mesure en appuyant sur	72
4.2- Définir le système de coordonnées de la pièce	73
4.2.1 Identification du niveau.....	73
4.2.2 Déterminer le point d'origine.....	74
5. Le programme de mesure est apparu.....	75
5.1 longueur et la largeur.....	75
5.2 Les cercle.....	76
5.3 la cylindricité.....	78
5-4 angles	81
5-5 distances entre 2 point.....	82
6. Conclusion.....	83

Chapitre VI

Introduction	85
Partie 1	86
1. introduction	86
2. objectif de l'étude	86
3. Description de la méthode et des entités mesurées	86
4. présentation et organisation des résultats	87
4.1 Exemple de l'observation.....	87
4.2 Interprétation graphique	88
5. discussion et interprétation des résultats	89
6. sources potentielles des écarts.....	89

7. Analyse graphique des données	90
7.1 Analyse graphique de la tendance	90
7.2 Analyse de la dispersion - graphique encadré.....	90
7.3 Analyse de la précision	91
Conclusion.....	92
Partie 2.....	93
1. Résultats de la mesure pour la pièce imprimée en 3D	93
2. Résultats de la mesure pour la pièce fabriquée en aluminium (CNC).....	94
3 Analyse des différences entre les deux pièces	95
3.1 La pièce imprimée en 3D	95
3.2 La pièce fabriquées en aluminium CNC.....	95
.33 conclusion.....	96
4. analyses de résultats de mesure géométrique.....	96
4.1 Lecteur de graphique.....	97
4.2 Explication	97
4.3 Conséquences de la conformité.....	97
5. Analyses de résultats – pièce usinée CNC	98
5.1 Lecteur de graphique.....	98
5.2 Explication	99
5.3 Conséquences de la conformité.....	99
6. Une comparaison compositionnelle entre l'impression 3D et l'impression numérique	100
7. Tableaux de comparaison avec FIGS.....	100
7.1 Écart moyen, maximum et taux de conformité	100
Conclusion.....	101
Conclusion général	103
Référence.....	104

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1: Principe d'un palpeur dynamique à déclenchement.....	16
Figure I.2 : Principe de liaison isostatique de boys	17
Figure I.3: Procédure d'étalonnage d'un palpeur simple.....	18
Figure I.4: Etalonnage de palpeur.....	18
Figure I.5: Etalonnage d'un système en étoile	19
Figure I.6: Différents type de palpeur.....	19
Figure I.7: a) Principe des MMT [1]. b) Point saisi, point mesuré [1].	22
Figure I.8: Illustration de la différence entre l'erreur de mesure et l'incertitude de mesure.	26
Figure I.9: Contrôle d'une pièce aéronautique par MMT [4].	28
Figure I.10: Contrôle d'une pièce motrice par MMT [4].....	28
Figure I.11: Genoux contrôlé par MMT [4].....	29
Figure I.12: Contrôler pièce engrenage par MMT [4].	29
Figure I.13: Contrôler l'aile des turbines par MMT [4].....	30

Chapitre II

Figure II.1 : Des objets imprimés en 3D.....	36
Figure II.2 : L'impression couche par couche	37
Figure II.3 : impression couche par couche d'un palmier	38
Figure II.4 : L'orientation et la déviation du palmier	39
Figure II.5 : Imprimante FDM	40
Figure II.6 : Stéréo lithographie	40
Figure II.7 : Frittage laser (SLS)	41
Figure II.8 : Procédé poly jet	42
Figure II.9 : Procédé DLP.....	43
Figure II.10 : Schéma d'une imprimante 3D à dépôt de filament fondu	43
Figure II.11 : Composantes de l'extrudeuse	44
Figure II.12 : Schématisations de la buse	45
Figure II.13 : Filament de PLA	47
Figure II.14 : Filament d'ABS générique	48
Figure II.15 : Poudre de polyamide.....	48
Figure II.16 : Résine liquide.....	48
Figure II.17 : Titane.....	49
Figure II.18 : Aluminium.....	49
Figure II.19 : Bois.....	50
Figure II.20 : Béton.....	50
Figure II.21 : Cœur humain a été imprimé 3D	51
Figure II.22 : Utilisation de l'impression 3D pour imprimer une pièce d'avion	52
Figure II.23 : Une pièce motrice imprimée complètement en 3D	52
Figure II.24 : Morceau de viande imprimé 3D	53
Figure II.25 : Maison totalement imprimée en 3D	54

Chapitre III

Figure III.1 : Conception de pièce par logiciel CAT.....	56
Figure III.2 : Conception initiale de la pièce.....	57
Figure III.3 : Définir chanfrein sur la pièce.....	57
Figure III.4 : Dessiner des cercles pour la pièce.....	58
Figure III.5 : Pièce finale.....	58
Figure III.6 : Interface du programme.CURA.....	59
Figure III.7 : Insertion de la pièce dans un programme CURA.....	59
Figure III.8 : Paramètres d'impression des pièces.....	60
Figure III.9 : Étapes d'impression avec une machine à imprimer.....	61
Figure III.10 : Pièce finale après l'impression.....	61
Figure III.11 : Préparation de la pièce brute en aluminium.....	62
Figure III.12 : Couper la pièce brute.....	63
Figure III.13 : Début de la fabrication en installant la pièce en aluminium.....	63
Figure III.14 : identification sur la pièce –A- chanfrein –B- cercle –C- Angle	64
Figure III.15 : Installer et déterminer la référence de la pièce à l'intérieur de la machine CNC ..	47
Figure III.16 : Machine mesure tridimensionnelle MMT.....	53
Figure III.17 : Déterminer la planéité de la surface à l'aide d'une machine (MMT)	55
Figure III.18 : Déterminer l'origine de la pièce à l'aide d'une machine.....	56
Figure III.19 : Déterminer la longueur et largeur de la pièce à l'aide d'une machine.....	57
Figure III.20 : Déterminer la circularité de la pièce à l'aide d'une machine.....	58
Figure III.21 : Déterminer la circularité de la pièce sur (ZX) à l'aide d'une machine	59
Figure III.22 : Déterminer la circularité de la pièce sur (YZ) à l'aide d'une machine.....	59
Figure III.23 : Déterminer la cylindricité de la pièce à l'aide d'une machine.....	60
Figure III.24 : Déterminer la cylindricité de la pièce à l'aide d'une machine.....	61
Figure III.25 : Déterminer la cylindricité de la pièce à l'aide d'une machine.....	62
Figure III.26 : Déterminer la cylindricité de la pièce à l'aide d'une machine.....	62
Figure III.27 : Déterminer l'angle de la pièce à l'aide d'une machine.....	63
Figure III.28 : Déterminer la distance entre 2 point de la pièce à l'aide d'une machine.....	64

Chapitre IV

Figure IV.1 : Fiabilité de machine mesure tridimensionnelle.....	69
Figure IV.2 : Évolution des mesures pour différentes entités (lignes par entité)	70
Figure IV.3 : Dispersion des mesures (boxplot) par attribut.....	71
Figure IV.4 : Écart type des mesures pour chaque entité.....	71
Figure IV.5 : Mesurer les écarts et les tolérances de la pièce imprimée en 3D.....	76
Figure IV.6 : Mesurer les écarts et les tolérances de la pièce Usiné en CNC.	78

Liste des tableaux :

Tableau II.1 : Evolution de récapitulatif sur l’historique du l’impression 3D	21
Tableau IV.1 : Quatre déférences mesure par MMT.....	68
Tableau IV.2 : Résultats de la pièce faite par machine d’impression 3D.....	73
Tableau IV.3 : Résultats de la pièce faite par machine CNC.....	74
Tableau IV.4 : Comparaison compositionnelle entre l’impression 3D et numérique.....	80
Tableau IV.5 : Comparaison Écart moyen, maximum et taux de conformité	80
Tableau IV.6 : Analyse des types d’erreurs courants	81

Introduction générale :

L'industrie moderne connaît une évolution rapide grâce à l'émergence de nouvelles technologies de fabrication, notamment la fabrication additive (impression 3D), qui vient compléter les méthodes traditionnelles telles que l'usinage CNC. Ces avancées ouvrent des perspectives prometteuses en matière de conception, de rapidité de production et d'optimisation des ressources. Toutefois, elles soulèvent également des enjeux majeurs en matière de contrôle qualité, en particulier pour garantir le respect des tolérances dimensionnelles et géométriques exigées dans de nombreux secteurs industriels.

Dans ce contexte, l'utilisation d'équipements de métrologie avancés, comme les machines à mesurer tridimensionnelles (MMT), s'impose comme une solution incontournable pour assurer la conformité des pièces produites, quel que soit le procédé de fabrication utilisé. Grâce à leur capacité à mesurer avec une grande précision les dimensions, les formes et les positions spatiales des éléments, les MMT sont devenues des outils de référence dans les laboratoires de contrôle qualité. Le présent travail s'inscrit dans cette problématique. Il a pour objectif de comparer la précision géométrique de pièces fabriquées selon deux procédés distincts : la fabrication additive et l'usinage CNC. Pour ce faire, une machine à mesurer tridimensionnelle a été utilisée comme instrument de mesure principal. Cette étude repose à la fois sur un socle théorique solide et sur des expérimentations pratiques réalisées en atelier.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre présente en détail la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), en expliquant son principe de fonctionnement, ses composants essentiels ainsi que ses principales applications dans le domaine de la métrologie. Le deuxième chapitre est consacré aux techniques d'impression 3D ; il décrit les procédés utilisés, les matériaux couramment employés, ainsi que les avantages et les limites de cette technologie. Le troisième chapitre expose la méthodologie expérimentale adoptée, incluant la fabrication des pièces, leur positionnement, les réglages effectués ainsi que les conditions de mesure. Enfin, le quatrième chapitre est divisé en deux parties : la première porte sur la vérification de la fiabilité de la MMC à l'aide d'une pièce de référence en aluminium mesurée à plusieurs reprises, tandis que la seconde présente une analyse comparative des pièces produites par impression 3D et usinage CNC. Cette analyse met en lumière les écarts géométriques observés, leur interprétation, ainsi que les conclusions pouvant être tirées concernant la qualité dimensionnelle de chaque procédé.

Chapitre -I-

Généralité sur les Machines a mesuré
tridimensionnelle
(MMT)

Introduction :

Les machines à mesurer tridimensionnelle (MMT), ou Coordinate Measuring Machines (CMM) en anglais, sont des équipements de métrologie utilisés pour effectuer des mesures dimensionnelles précises dans un espace à trois dimensions. Elles permettent de relever les coordonnées exactes de points situés sur la surface d'une pièce grâce à un palpeur se déplaçant selon trois axes orthogonaux (X, Y et Z). Ces mesures sont ensuite exploitées pour vérifier la conformité des pièces par rapport aux tolérances définies sur les plans techniques ou les modèles numériques. Le principal objectif des MMT est d'assurer la qualité des pièces usinées ou fabriquées, en contrôlant des éléments géométriques tels que les longueurs, diamètres, formes (planéité, circularité) et positions relatives des surfaces.

Une MMT se compose généralement d'une structure rigide (souvent en granite ou en aluminium), d'un système de guidage permettant le déplacement du palpeur, d'un capteur (tactile ou optique) pour la détection des points, et d'un logiciel de mesure assurant la programmation, l'acquisition et l'analyse des données. On distingue plusieurs types de MMT selon leur architecture : les machines à portique (les plus répandues), les bras horizontaux pour les grandes pièces, les bras articulés pour les mesures mobiles ou sur site, et les MMT optiques ou sans contact qui utilisent des systèmes de vision ou des lasers pour les pièces fragiles.

Les MMT offrent de nombreux avantages tels qu'une grande précision, une reproductibilité fiable, une réduction du temps de contrôle, ainsi qu'une bonne intégration avec les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO). Cependant, elles présentent également certaines limites, notamment un coût élevé, une sensibilité aux conditions ambiantes (température, vibrations), ainsi que la nécessité d'avoir du personnel qualifié pour leur utilisation et l'interprétation des résultats.

2- Historiques et évolution :

La norme ISO 10360-2 :1994 donne par définition : "dispositif de mesure utilisé à poste fixe, conçu pour des mesurages à partir d'au moins trois déplacements linéaires ou angulaires générés par la machine. L'un au moins doit être une mesure linéaire."

1962 : la société italienne *DEA* met au point la première Machine à Mesurer Tridimensionnelle dans un garage de Borgo San Paolo près de Turin. Dix ans plus tard, la société *Carl Zeiss* présente l'UMM500 : équipée d'un palpeur universel, d'un calculateur et d'une commande numérique, elle marque une évolution fondamentale dans ce qui fait aujourd'hui la MMT moderne, telle que nous la connaissons.

Bien entendu, depuis les années 70 ces machines ont largement évolué que ce soit sur le plan mécanique, électronique et informatique, mais le principe reste le même : un capteur à déclenchement ou statique permettant de mesurer un point sur n'importe quel type de surface, un outil informatique autorisant des calculs puissants pour le calcul de côtes et l'édition de résultats facilement exploitables.

Nous devons l'invention du premier palpeur à déclenchement en 1970 à un anglais, David Mac Murtry, ingénieur chez Rolls-Royce. Trois ans plus tard, il fonde, avec M. John Deer, la société *Renishaw*, afin de produire ce palpeur de façon industrielle.

3- Composante de machine MMT :

Une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), est un système complexe composé de plusieurs éléments essentiels qui travaillent ensemble pour effectuer des mesures géométriques précises. Voici les principaux composants :

3.1 Structure de la MMT :

-Bâti : base rigide qui supporte l'ensemble de la machine

-colonnes et ponts (selon le type de MMT) : structures mobiles ou fixes qui permettent le déplacement du palpeur dans l'espace.

3.2 Système de guidage et de déplacement :

-Rails ou glissières : assurent du mouvement précis et fluide des axes

-vis à billes ou moteurs linéaires : responsable déplacement des axes X, Y et Z

3.3 System de Palpage :

- 3.3.1 Généralités

Un palpeur n'est autre qu'un commutateur élaboré conçu pour se Déclencher lors du contact avec une surface de la pièce et produire des données Géométriques précises et répétables (coordonnées X, Y, Z).

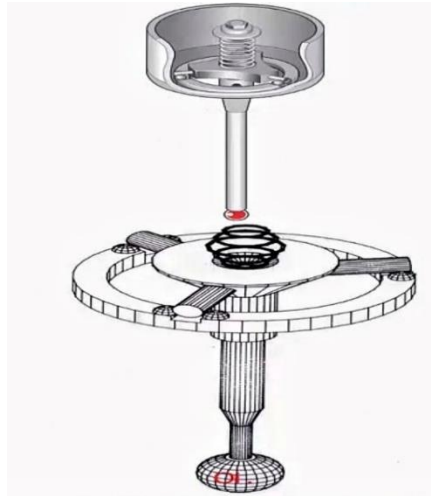


Figure I.1: Principe d'un palpeur dynamique à déclenchement.

Le dispositif de palpation le plus utilisé dans les MMT est le système de palpeur Renishaw, c'est un palpeur dynamique à déclenchement. Le palpeur dynamique à déclenchement est construit sur le principe de la liaison isostatique de Boys ci-dessous.

On parle de tête de Palpage dynamique : au moment du contact entre le palpeur et la surface palpée, se produit dans la tête une rupture de contact Électrique qui déclenche l'ordre de lecture de la position de la sphère située à L'extrémité du palpeur (en coordonnées X, Y Z).

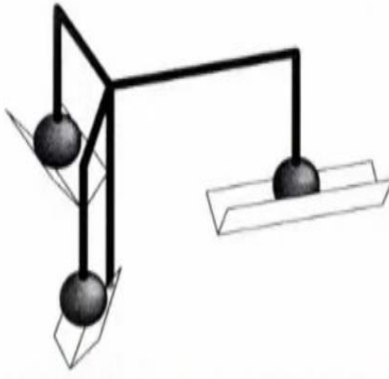


Figure I.2 : Principe de liaison isostatique de boys

- **3.3.2 Principe de fonctionnement de system palpage :**

Les 6 points de contact sont montés en série électriquement et traversés en permanence par un courant faible. Lorsque la bille vient au contact de la pièce, le solide touche tripode passe d'une situation isostatique à une situation hyperstatique. Un des 6 points tend à décoller et la résistance électrique du palpeur varie alors fortement. A partir de cette variation importante et brutale de la résistance, une électronique de traitement génère un signal de commutation qui permettra d'actionner la lecture des règles de mesure des axes X, Y et Z. Pour assurer un bon contact sur les points d'appuis et pour éviter que le palpeur ne déclenche sous l'effet des accélérations nécessaires pour déplacer la MMT, un ressort tarable exerce un effort réglable au centre de l'étoile. Le ressort va provoquer un retard au déclenchement qui varie avec la géométrie des touches et le tarage. Néanmoins la remise en position de l'étoile après un mouvement est meilleure que 0,1 micron.

- **3.3.3 Etalonnage des palpeurs :**

- **Procédure d'étalonnage d'un palpeur simple :**

Si la mesure complète d'une pièce nécessite l'utilisation de plusieurs stylets pour accéder à toutes les surfaces, il faut être capable de corriger le rayon de la bille de chaque palpeur. Pour être capable d'exprimer des relations géométriques entre les surfaces mesurées avec différents palpeurs, ces surfaces doivent être exprimées dans le même repère, celui de la sphère étalon.

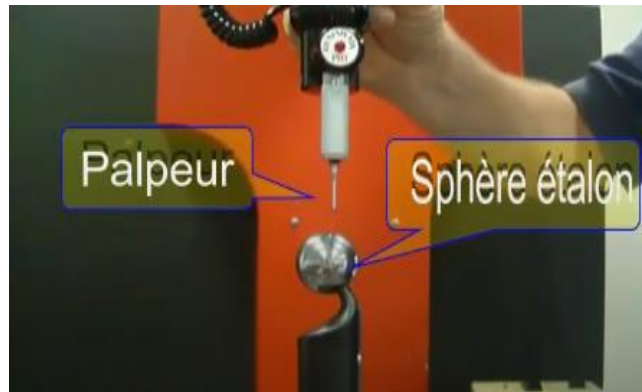


Figure I.3: Procédure d'étalonnage d'un palpeur simple.

Pour diminuer l'influence de la flexion du stylet et du retard au déclenchement du palpeur, on détermine le diamètre fictif de la bille d_{β} du stylet en mesurant en 5 points une sphère étalon dont le diamètre D est connu par rattachement à la chaîne d'étalonnage. A l'IUT $D_e = 24,995\text{mm}$ Le diamètre mesuré en 5 points passant par les 5 centres bille vaut D_m . A cause du retard au déclenchement, le système calcule un diamètre fictif de la bille $\alpha\Delta = f(D_e, D_m, \Delta\alpha)$ $\Delta\alpha$ étant l'angle du stylet par rapport à la verticale

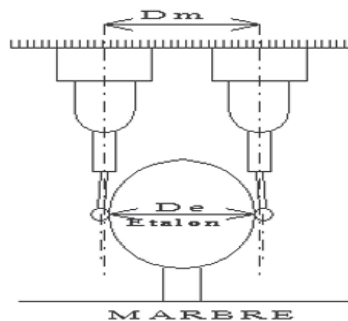


Figure I.4: Etalonnage de palpeur.

○ **Etalonnage d'un système en étoile :**

Si, pour pouvoir accéder à toutes les surfaces d'une pièce, on doit utiliser plusieurs billes, il faudra pratiquer une opération d'étalonnage qui consiste à mesurer préalablement la même sphère de référence avec toutes les billes. Cette opération permet de déterminer les coordonnées (X_b , Y_b , Z_b) de chacune des billes dans le repère de la machine.

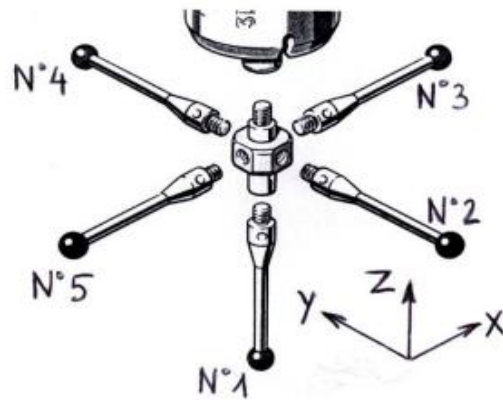


Figure I.5: Etalonnage d'un système en étoile

- **3.3.4 Type de palpeur :**

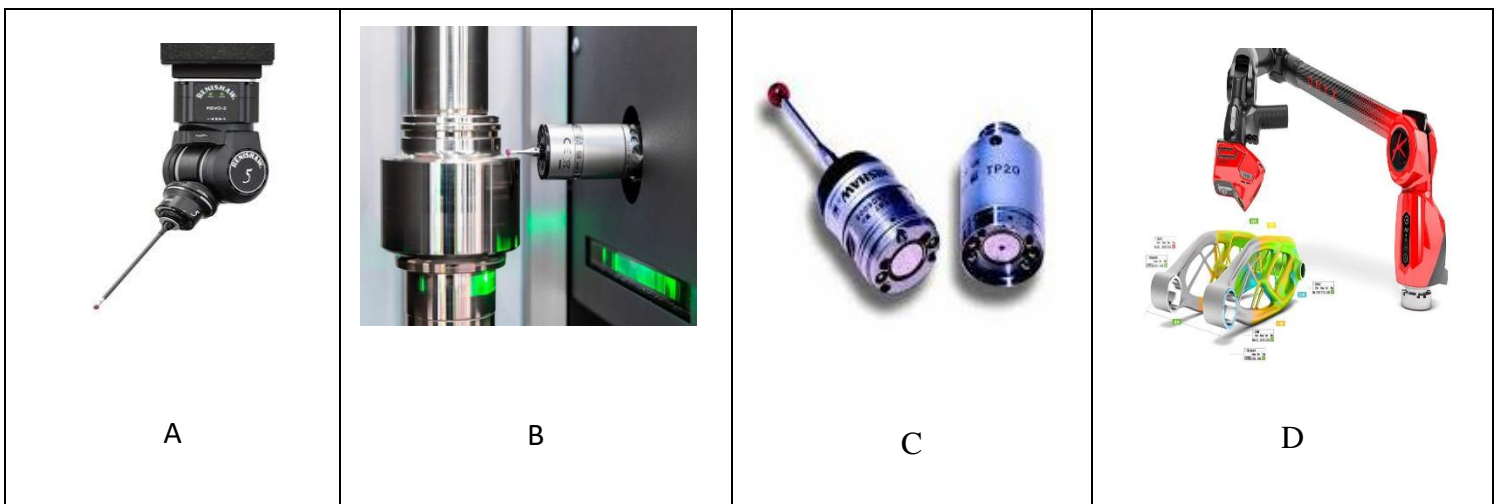


Figure I.6: Différents type de palpeur.

- 1. Palpeur de contact :**

Le palpeur le plus couramment utilisé et constitué d'un stylet muni d'une bille à son extrémité. Il peut fonctionner selon deux principes : soit de manière mécanique, par simple contact avec la surface mesurée, soit de manière électronique, grâce à des capteurs intégrés qui détectent précisément le point de contact (Figure I.5-A).

- 2. Palpeur optique :**

Cet appareil utilise des lasers ou des capteurs optiques pour effectuer les mesures de manière non contact. Il se distingue par sa rapidité et sa grande précision, ce qui le rend particulièrement adapté à l'inspection de matériaux fragiles ou flexibles, qui pourraient être endommagés par des méthodes de mesure traditionnelles (Figure I.5-B).

3. Palpeur déclencheur :

Ce type de capteur émet un signal électrique dès qu'il entre en contact avec une surface, permettant ainsi de détecter avec précision les points mesurés. Bien qu'il offre une grande exactitude, il est généralement plus lent que les systèmes de numérisation continuent, ce qui peut limiter son utilisation dans certaines applications nécessitant une acquisition rapide des données (Figure I.5-C).

4. Palpeur à scanner :

Ce système permet de capturer un grand nombre de points en un seul passage, ce qui le rend particulièrement efficace pour l'acquisition rapide de données. Il est couramment utilisé pour l'inspection de surfaces complexes, telles que les formes libres et les courbes, où une représentation détaillée de la géométrie est essentielle (Figure I.5-D).

4- Système de collecte et de mesure des données :

Le système de mesure d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) repose sur un ensemble de composants sophistiqués, chargés de capturer et d'interpréter avec précision les données relatives aux dimensions et aux géométries des pièces. Parmi ces composants, les capteurs de position jouent un rôle essentiel en mesurant les déplacements des axes avec une précision pouvant atteindre le micron. Ces capteurs peuvent être de nature optique ou magnétique, selon la technologie employée. Afin de garantir la fiabilité des mesures, des systèmes de correction d'erreurs sont également intégrés. Ceux-ci incluent notamment la compensation de température, qui permet d'ajuster les résultats en fonction des variations de la température ambiante, ainsi que des mécanismes de débogage technique, visant à corriger d'éventuels défauts structurels de la machine. De plus, des capteurs de vibrations sont utilisés pour détecter et atténuer les perturbations mécaniques susceptibles d'affecter la précision des mesures. L'ensemble de ces dispositifs contribue à assurer des mesures fiables, stables et conformes aux exigences métrologiques de l'industrie moderne.

5- Accessoires et options :

Certains équipements améliorent les performances et la précision de la machine à mesurer tridimensionnelle :

- Table de mesure en granit : Assure une bonne stabilité thermique et une surface de référence précise.
- Systèmes de fixation de pièces : Fixation par ventouses, magnétiques ou à reliure pour maintenir les pièces en place.
- Bras de mesure supplémentaire : Pour atteindre les zones difficiles d'une pièce complexe.
- Systèmes d'étalonnage automatique : Vérifiez régulièrement la précision de l'appareil et de la sonde.

6- Principe et fonctionnement des MMT :

MMT permet la vérification 3D de la conformité de pièces aux formes complexes. Les dispositifs de mesure micromécaniques (MMT) se composent essentiellement de trois axes de mesure et d'un système de contrôle avec une borne de contact montée à l'extrémité du dernier axe. En fonction des mouvements des axes de mesure associés aux règles de mesure de haute précision, il est possible d'estimer les coordonnées x, y et z du point de contact entre la pointe de la sonde et la surface à mesurer.

La pièce à mesurer est fixée sur le marbre. Le système de balayage établit une relation entre le contact physique de la pointe de balayage sur la surface à mesurer et la lecture des trois déplacements. Les coordonnées calculées sont ensuite traitées par un logiciel afin d'effectuer des mesures 3D et de vérifier les tolérances dimensionnelles et géométriques des pièces mécaniques.

Pour mesurer la forme de la surface d'une pièce positionnée sur le marbre de la MMT, la touche du stylet, qui est une sphère de centre ω_i située à l'extrémité du stylet, touche différents points M_i sur la surface à mesurer. Le système de contrôle de la machine saisit les coordonnées du centre ω_i . En fonction de la normale (qui doit être estimé) à la surface au point M_i et le rayon apparent r_j (calculé pour chaque orientation de palpeur et chaque stylet), on calcule les coordonnées du point mesuré M_i par la relation suivante [1] :

$$SM_i = S\omega_i + r_j n_i$$

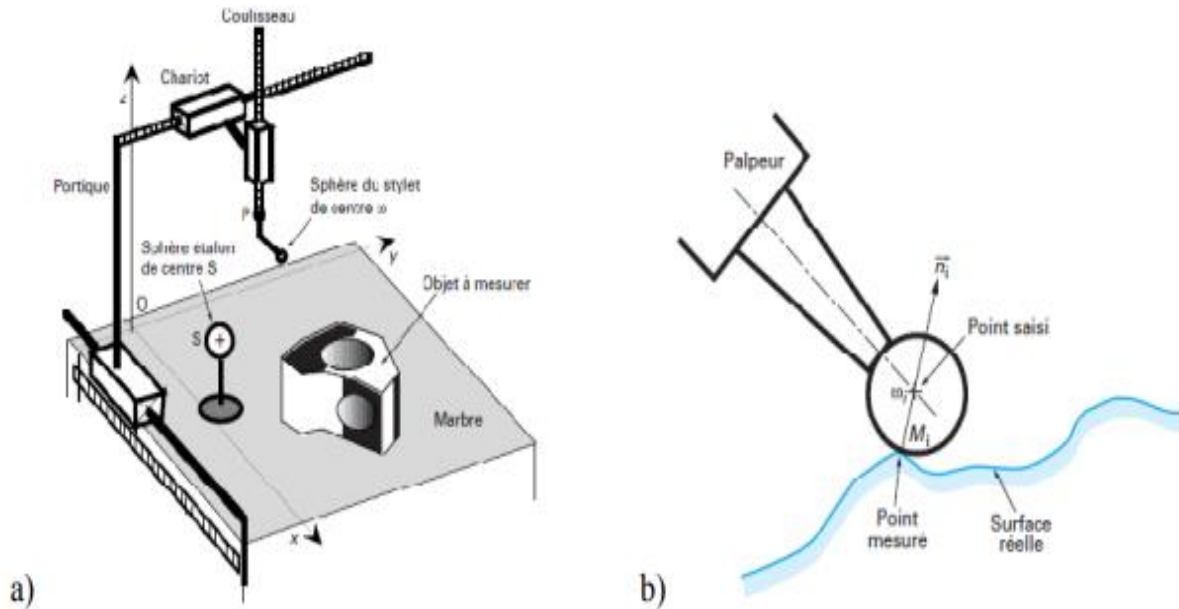


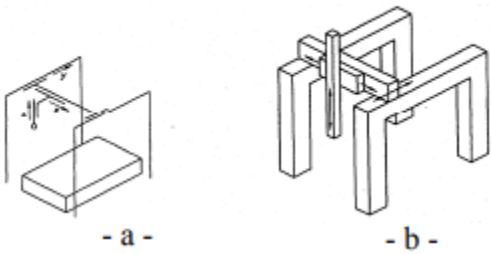
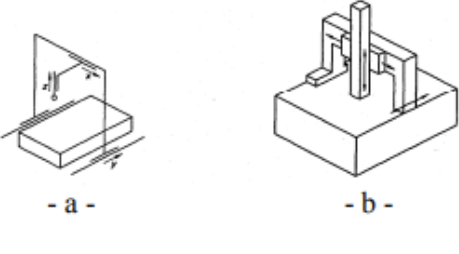
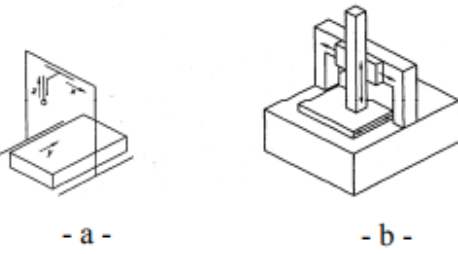
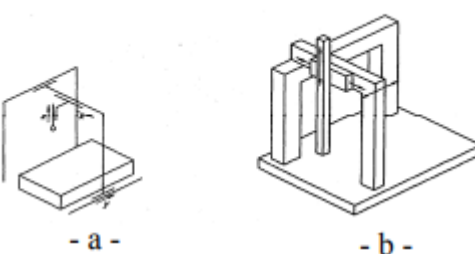
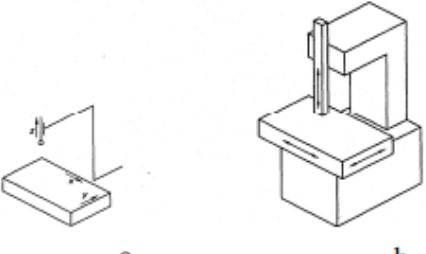
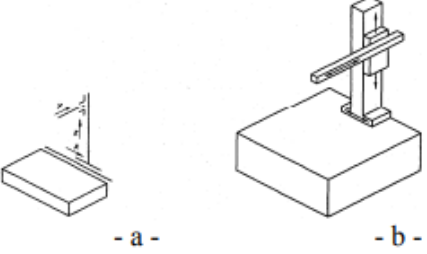
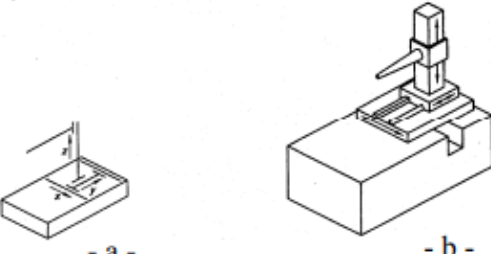
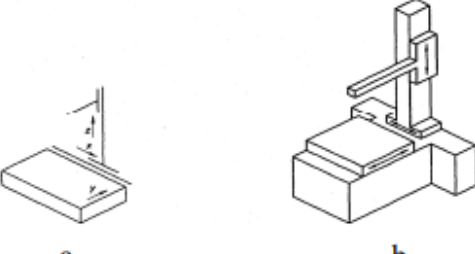
Figure I.7: a) Principe des MMT [1].

b) Point saisi, point mesuré [1].

7- Structures des machines à mesurer tridimensionnelles :

Les unités de contrôle mécanique sont classées en différentes structures selon leurs styles et leurs tailles, allant du contrôle de petits composants mécaniques au contrôle des structures de véhicules. Chaque structure répond à un besoin différent de contrôle de taille et de précision, mais la logique reste la même : trois guides orthogonaux, deux par deux, désignés par les trois dernières lettres de l'alphabet X, Y et Z ; X et Y correspondent aux axes horizontaux et l'axe vertical est constitué de ce qu'on appelle Z.

Montre les différentes structures des machines MMT, où -a- représente le diagramme cinétique de la machine et -b- représente un exemple de la structure de la machine.

<p style="text-align: center;">MMT pont</p>  <p style="text-align: center;">- a - - b -</p>	<p style="text-align: center;">MMT à portique mobile</p>  <p style="text-align: center;">- a - - b -</p>
<p style="text-align: center;">MMT à portique fixe</p>  <p style="text-align: center;">- a - - b -</p>	<p style="text-align: center;">MMT à portique en L</p>  <p style="text-align: center;">- a - - b -</p>
<p style="text-align: center;">MMT à colonne</p>  <p style="text-align: center;">- a - - b -</p>	<p style="text-align: center;">MMT à bras horizontal mobile (trusquin)</p>  <p style="text-align: center;">- a - - b -</p>
<p style="text-align: center;">MMT à bras horizontal à plateau fixe</p>  <p style="text-align: center;">- a - - b -</p>	<p style="text-align: center;">MMT à bras horizontal à plateau mobile</p>  <p style="text-align: center;">- a - - b -</p>

8- Analyse d'une mesure sous Machine à Mesurer Tridimensionnelle :

Une machine à mesurer par coordonnées (MMT) sert à déterminer la position du centre de la bille de sonde dans l'espace lorsqu'elle entre en contact avec la surface de la pièce. La connaissance théorique ou empirique de la ligne perpendiculaire à la surface au point du feutre ainsi que du rayon du feutre permet de comprendre le point mesuré avec une reconnaissance locale de la surface mesurée sur une face plane (Correvits et al. 1991). Dans le cas d'une comparaison point à point avec un modèle théorique, le résultat de la mesure peut être exprimé comme un écart par rapport à la normale. Sous réserve de pièces présentant de légères courbures, cette écriture permet d'éliminer l'influence des erreurs de positionnement de la pièce dans l'espace machine ainsi que des erreurs servo apparentes de la machine. Grâce à un logiciel de mesure qui offre un grand potentiel de traitement et d'optimisation des informations, cette méthode de mesure complète permet de déterminer toutes les caractéristiques dimensionnelles de la pièce. Une attention particulière doit être accordée à la stratégie d'acquisition des points de mesure et à la méthodologie de construction choisie afin de ne pas introduire un biais systématique. En fin de compte, la qualité du résultat exprimé dépend toujours de la qualité de l'acquisition individuelle des points par chaque individu. Ce concept est exprimé sous forme d'incertitude de mesure [2].

8.1 Sources de perturbation d'une Machine à Mesurer Tridimensionnelle :

Le bilan d'incertitude d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) révèle de nombreuses sources de turbulence. Elles peuvent être classées en deux grandes catégories : les erreurs systématiques et les erreurs aléatoires. Les erreurs systématiques sont des erreurs qui se reproduisent dans des conditions d'utilisation identiques de la machine et peuvent donc être identifiées. Ils consistent principalement en des défauts géométriques dans les composants de la machine et les guides.

Les causes des erreurs aléatoires sont par définition plus difficiles à identifier. Ils peuvent provenir de sources internes à l'appareil ou être dus à des perturbations externes. Leurs effets peuvent être décrits en partie par des tests de réplique automatisés ou par la mesure d'éléments géométriques simples de petites dimensions. Une liste non exhaustive des sources d'erreurs peut être ébauchée :

- Déformation de la machine (gradient thermique, défaut de guidage, justesse, palpeur)
- Erreurs d'interpolation des règles, manque de résolution

- Répétabilité (phénomènes aléatoires) Déformation de la pièce (serrage, thermique, état de surface)
- Erreurs de positionnement de la pièce dans l'espace machine

8.2 Amélioration de la qualité des machines :

Améliorer la qualité des machines implique de réduire l'impact des erreurs systématiques et aléatoires sur les mesures. Les erreurs systématiques sont caractérisées par la capacité d'être essentiellement répétitives. Ainsi, pour certains d'entre eux, on peut considérer leur identification par des moyens de mesure externe ou d'auto-étalonnage et leur correction physique ou par un logiciel. Le modèle de correction logicielle conventionnellement utilisé consiste à décrire les défauts de direction individuels pour chaque essieu et leur position relative à l'aide d'un tableau des défauts. Cette écriture est basée sur la prémisse de l'indéformabilité des solides et l'utilisation de petits déplacements Torsion. La première limitation de cette correction réside dans la possibilité de décrire des erreurs, en particulier celles caractérisées par un changement rapide. Par exemple, les erreurs d'interpolation dans les règles de mesure du déplacement sont assez reproductibles mais difficiles à corriger en raison de la période de variation extrêmement courte (quelques μm). La quantité de données qui devront être spécialement codées et acquises sera extrêmement élevée. En pratique, ce type d'erreur n'est pas intégré dans les tableaux de correction et affectera l'équilibre des incertitudes. La deuxième limite est la stabilité des erreurs systématiques entre le moment de leur acquisition (codage de table de correction) et l'utilisation du dispositif. Cette stabilité dépend principalement des conditions de stabilité de l'environnement thermique et du manque de gradient thermique interne à l'intérieur de la machine. Il existe des modèles de correction basés sur le gain de température ; ils sont particulièrement efficaces dans les systèmes de mesure de déplacement. En bref, l'incertitude de mesure à un point donné de la machine est définie par l'accumulation statistique de sources individuelles d'incertitude composées d'erreurs aléatoires et d'écarts d'erreur systématiques. Pour des dimensions inférieures à un mètre, le niveau d'incertitude pratique est de l'ordre de quelques micromètres pour les machines industrielles et de moins d'un micromètre pour les meilleures machines de laboratoire.

8.3 Amélioration de la qualité des mesures :

Le potentiel de précision d'une machine sera donc toujours limité par la sensibilité de ces composants, voire par leur sensibilité atténuée, aux perturbations externes et surtout thermiques. Cependant, ces limites peuvent être repoussées par la mise en œuvre de procédures de mesure spécifiques basées sur des stratégies d'auto-éliminassions des erreurs systématiques de machine associées à la réduction des effets des erreurs aléatoires grâce à la moyenne. Les stratégies pour l'auto-éliminassions des erreurs systématiques dans la machine sont beaucoup plus efficaces que leur correction classique parce que leur identification et élimination se fait par pendant le processus de mesure des pièces et non lors de la création du tableau de correction. L'élimination de l'effet des erreurs systématiques reste donc conditionnelle à leur stabilité, non pas sur plusieurs semaines ou mois, mais sur des périodes beaucoup plus courtes, c'est-à-dire le temps nécessaire pour mesurer la fraction dans différentes positions [3].

9- Erreur de mesure et incertitude sur la mesure :

L'incertitude est une indication de la qualité d'un résultat de mesure. Il y a une différence entre l'erreur de mesure et l'incertitude de mesure. L'erreur de mesure est la différence entre la valeur indiquée par la mesure et la valeur vraie (longueur d'une cale étalon). L'incertitude de mesure exprime toutes les erreurs non corrigées. Lorsqu'on évalue les erreurs expérimentalement et que les corrections appropriées sont appliquées, il reste encore une incertitude sur la validité du résultat annoncé. Illustre la différence entre l'erreur de mesure et l'incertitude.

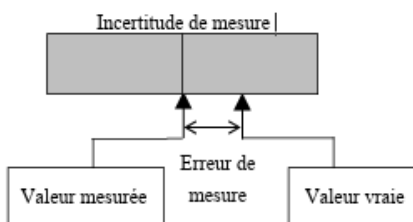


Figure I.8: Illustration de la différence entre l'erreur de mesure et l'incertitude de mesure.

Le but du métrologue est d'annoncer un résultat de mesure proche de la valeur vraie. Pour atteindre cet objectif, il diminue les erreurs systématiques en appliquant des corrections et il

Diminue les erreurs aléatoires en répétant son processus de mesure un certain nombre de fois. Un résultat de mesure est une variable aléatoire. Le résultat annoncé par le métrologue estime l'espérance mathématique de la variable aléatoire. Le calcul d'incertitude de mesure sur une MMT a fait l'objet de plusieurs études. Un résultat de mesure présenté avec une incertitude permet de fournir une indication quantitative sur la qualité de ce résultat. Cette information est essentielle pour que ce résultat soit utilisé avec fiabilité.

10- Applications industriels : [4]

Les Machines à Mesurer Tridimensionnelles (MMT) sont des outils essentiels dans de nombreuses industries pour le contrôle qualité et la métrologie dimensionnelle. Voici les principales applications industrielles [4] :

1. **Contrôle Qualité et Inspection** : C'est l'application la plus courante. Les MMT vérifient si les dimensions et les tolérances géométriques des pièces fabriquées sont conformes aux spécifications du dessin technique (plan). Cela garantit la qualité et la fonctionnalité du produit final.

Exemples : Vérification des cotes critiques, des formes (cylindricité, planéité, etc.), des positions (parallélisme, perpendicularité), des profils.

2. **Aéronautique et Aérospatiale** : Ce secteur exige une précision et une fiabilité extrêmes. Les MMT sont utilisées pour inspecter des composants critiques comme :

Les aubes de turbines et de compresseurs.

Les éléments structurels des avions (nervures, longerons).

Les pièces de moteurs.

Les composants de satellites.



Figure I.9: Contrôle d'une pièce aéronautique par MMT [4].

3. Industrie Automobile : La production de masse et les exigences de sécurité rendent les MMT indispensables pour :

Le contrôle des pièces moteur (blocs-cylindres, vilebrequins, culasses).

La vérification des éléments de transmission (engrenages, arbres).

L'inspection des panneaux de carrosserie et du châssis pour assurer un assemblage correct.

Le contrôle des moules et des matrices d'emboutissage.

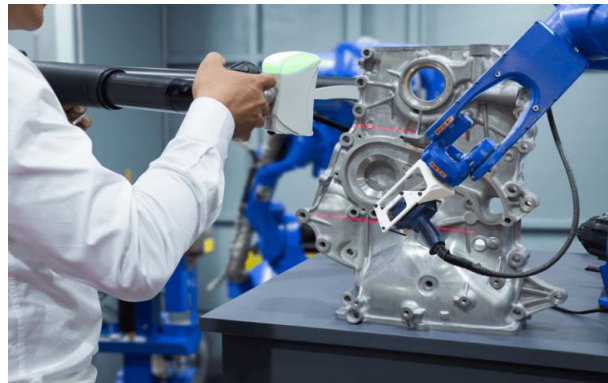


Figure I.10: Contrôle d'une pièce motrice par MMT [4].

4. Fabrication de Dispositifs Médicaux : La précision est vitale pour les implants et les instruments chirurgicaux. Les MMT assurent que ces pièces respectent des tolérances très serrées.

Exemples : Implants orthopédiques (hanches, genoux), instruments chirurgicaux, composants de pacemakers.



Figure I.11: Genoux contrôlé par MMT [4].

5. **Électronique** : Pour l'inspection de circuits imprimés (PCB), le positionnement précis des composants, et la vérification des connecteurs et des boîtiers.
6. **Mécanique Générale et de Précision** : Pour le contrôle de pièces usinées complexes, d'engrenages, de moules, d'outillages, et de calibres.



Figure I.12: Contrôler pièce engrenage par MMT [4].

7. **Énergie** : Inspection de composants pour les centrales électriques, les turbines (gaz, vapeur, éoliennes), et les équipements de forage.



Figure I.13: Contrôler l'aile des turbines par MMT [4].

- 8. Rétro-ingénierie (Reverse Engineering) :** Les MMT peuvent être utilisées pour numériser la géométrie d'une pièce existante dont on n'a pas les plans, afin de la recréer ou de l'analyser.
- 9. Assemblage et Ajustement :** Vérification de l'alignement et de la bonne interaction entre différentes pièces lors de l'assemblage
- 10. Validation de Prototype :** Contrôler rapidement et précisément si un prototype correspond bien au modèle CAO (Conception Assistée par Ordinateur)

Conclusion :

Ce premier chapitre nous a permis d'appréhender les fondements des machines de mesure tridimensionnelle, qui constituent aujourd'hui un outil incontournable dans le domaine du contrôle dimensionnel. Grâce à leur précision, leur rapidité et leur polyvalence, les MMT jouent un rôle central dans l'assurance qualité des pièces usinées ou imprimées, en particulier dans les secteurs exigeants comme l'aéronautique, l'automobile ou le médical.

Nous avons exploré les différents types de MMT (portiques, à bras articulé, à scanner, etc.), leurs composants essentiels (capteur, plateau, logiciel, palpeur), ainsi que les principes de fonctionnement qui permettent d'acquérir des données précises dans un espace tridimensionnel.

De plus, l'évolution technologique des capteurs et des logiciels de traitement a considérablement élargi le champ d'application de ces machines.

Ce chapitre présente les bases théoriques nécessaires pour aborder, dans les sections suivantes, l'utilisation pratique d'une MMT dans un contexte industriel. L'analyse des mesures réalisées sur des pièces issues de procédés de fabrication différents (comme l'usinage CNC ou l'impression 3D) permettra de mettre en lumière les performances métrologiques des MMT, ainsi que leur rôle dans l'optimisation des procédés de fabrication.

Chapitre –II–

Généralistes sur les imprimantes 3D

Introduction :

L'imprimante 3D représente l'une des innovations les plus importantes de la fabrication moderne. Il repose sur le principe de la fabrication additive, une méthode de production qui consiste à créer un objet en superposant des couches successives de matériaux, à partir d'un modèle numérique 3D. Contrairement aux techniques de fabrication soustractive traditionnelles, qui éliminent la matière d'une masse brute, l'impression 3D permet de concevoir des pièces complexes avec un minimum de déchets.

Depuis sa première apparition dans les années 1980, la technologie de l'impression 3D a connu une évolution spectaculaire, tant au niveau des matériaux utilisés (plastiques, résines, métaux, céramiques, etc.) que des applications. Aujourd'hui, il est utilisé dans de nombreux secteurs tels que l'aérospatiale, l'automobile, le médical, l'architecture, l'art et même l'industrie mécanique.

Cette technologie offre plusieurs avantages : réduction du temps de prototypage, personnalisation des pièces, optimisation de géométries complexes et, plus récemment, une contribution significative à la fabrication décentralisée et durable. L'imprimante 3D n'est plus seulement un outil de prototypage, elle tend à devenir une solution de production à part entière.

Dans ce contexte, la compréhension du fonctionnement, des types d'imprimantes, des matériaux pouvant être utilisés et des domaines d'application est essentielle pour bien comprendre les potentialités et les limites de cette technologie.

1- Historique :

La capacité de générer un objet tridimensionnel (3D) à partir d'une seule image semblerait être une idée tirée d'une œuvre fantastique ou de science-fiction. Néanmoins, à partir du milieu des années 1980, avec les premiers brevets sur la fabrication additive et l'impression 3D, cette possibilité future est devenue réalité. Initialement limitée aux polymères, la fabrication additive s'est maintenant étendue à un nombre toujours croissant de matériaux [5].

Les premiers essais d'impression 3D ont été réalisés par le Docteur Kodama. Il a développé une méthode de prototypage rapide en 1980. Il fut le premier à décrire une approche de la production couche par couche, créant ainsi un ancêtre de la Stéréo lithographie (SLA) : une résine photosensible est polymérisée par une lampe à UV. Malheureusement, il n'a pas rempli le dossier de dépôt de brevet avant la date limite. Ce n'est que le 16 juillet 1984 que le 1er brevet sur l'impression 3D (dite « fabrication additive ») est déposé. Les dépositaires sont français : Jean-Claude André, Olivier de Witte, et Alain le Mahaut pour le compte de l'entreprise CILAS ALCATEL. La même année, aux Etats-Unis, le 1er août 1984, c'est l'américain Chuck Hull qui dépose le brevet sur la technique d'impression 3D de stéréo lithographie (SLA pour Stéréo Lithographie Apparatus). Ce brevet donnera non seulement le nom de l'extension du fichier d'impression. Stl, mais donnera aussi naissance à une entreprise leader : 3D Système, géant de la fabrication d'imprimantes 3D, 3D systèmes lancera fin 1988 la première imprimante 3D, la SLA-250.

En 1987, le procédé de frittage laser sélectif (ou SLS pour Sintering Laser System) est inventé par l'entreprise DTM Corp. Ce nouveau procédé de fabrication additive consiste en la fabrication couche par couche de poudres polymères par frittage laser.

En 1988, une autre entreprise américaine, la société Stratasys fondée par Scott Crump, lance sur le marché une nouvelle technologie reposant elle aussi sur le dépôt couche par couche en fabrication additive : le procédé FDM pour Fused Déposition Modeling ou dépôt de fil fondu en français. Cette technique donnera naissance par la suite aux imprimantes domestiques personnelles telles que nous les connaissons aujourd'hui.

En 1995, c'est la technologie d'impression 3D métallique ou DMLS (Direct Métal Laser Sintering) qui fait son apparition. La technologie est similaire à celle du frittage laser sélectif mais adaptée aux métaux, avec un laser encore plus puissant.

En 2003, la société MCor technologies présente un nouveau procédé, le 3DPP (3D Paper Printing). L'impression 3D utilise du papier de format A4 agrégé en couches successives avec une colle spéciale, et couplé avec une lame en pointe de tungstène pour couper la forme.

En 2005 la société ZCorporation lance la première imprimante couleur, fonctionnant sur le même principe de quadrichromie que les imprimantes 2D couleurs que nous connaissons. L'impression sur la hauteur en couches successives est rendue possible grâce à une matière de type minérale agrégée par un liant de colle.

En 2006 apparaît pour la première fois un projet d'imprimante 3D open source qui ouvrira la voie aux futures imprimantes domestiques : le projet RepRap a été initié dès 2004 par le Dr Adrian Browyer alors professeur en génie mécanique de l'Université de Bath au RoyaumeUni. L'idée à la base de ce projet est de pouvoir construire par soi-même une imprimante 3D en technologie de dépôt de fil fondu. C'est le début de ce qu'on a pu appeler par la suite le mouvement Makers.

À partir de 2011, on voit apparaître des initiatives dans l'impression 3D alimentaire. C'est le cas avec l'impression 3D en sucre rendue possible par des machines fabriquées par exemple par la société américaine The Sugar Lab, rachetée en 2013 par le géant 3D System.

En 2012 la firme anglaise Choc Edge lance la première imprimante 3D chocolat. En 2014, l'évolution technologique s'attaque à la contrainte de la taille. La société chinoise Win Su annonce fabriquer des maisons en impression 3D. En 2015 la société Carbon3D annonce une nouvelle technologie révolutionnaire permettant de multiplier par 7 la rapidité en impression 3D. La technologie s'appuie sur l'utilisation de résine, lumière et d'oxygène pour polymériser l'objet [6].

Le tableau II.1 représente un récapitulatif sur l'historique du l'impression 3D :

Dates	Évènements
1980	Les premiers essais réalisés par le Docteur Kodama
16 /07/1984	Le premier brevet déposé par Jean-Claude André, Olivier de Witte, et Alain le Méhauté pour le compte de l'entreprise CILAS ALCATEL
01/08/1984	Le brevet déposé par l'américain Chuck HullSLA pour la SLA pour « StéréoLithographie Apparatus ».
1987	L'invention du frittage laser sélectif de SLS pour Sintring Laser System
1988	Le lancement de la première imprimante 3D (SLA-250) par 1988 l'entreprise américaine 3D systèmes

	Le lancement de FDM le dépôt du fil fondu par Stratasys
1995	L'apparition de l'impression 3D métallique DMLS
2003	MCor technologies lance 3DPP (3D Paper Printing)
2004	Le lancement du projet RepRap
2005	Z Corporation lance l'impression 3D en couleur
2006	L'apparition du premier projet 3D open source qui se repose sur l'initiative RepRap
2011	L'apparition de l'impression alimentaire en sucre
2013	Lancement de l'impression avec chocolat
2014	Le géant chinois annonce fabriquer des maisons avec impression 3D
2015	La société Carbon3D annonce une nouvelle technologie qui permet d'accélérer l'impression sept (7) fois plus

Tableau II.1 : Récapitulatif sur l'historique du l'impression 3D

2- Définition :

L'impression tridimensionnelle (3-D) est un procédé de fabrication additive qui crée un objet physique à partir d'une conception numérique. Le processus fonctionne en déposant de fines couches de matériau sous forme de liquide, de plastique ou de poudre métallique, ou de ciment, puis en fusionnant les couches ensemble [7].



Figure II.1 : Des objets imprimés en 3D.

Par contre, l'impression 3D se fait avec une imprimante 3D. Cette machine, qui peut être de tailles et d'apparences très différentes, est toujours associée à plusieurs programmes informatiques, qui

sont d'une grande importance dans le processus car ils permettent la préparation d'un fichier 3D de l'objet à fabriquer, ainsi que le contrôle de l'imprimante pendant tout le processus d'impression. Par conséquent, une imprimante 3D est une machine capable de fabriquer un objet physique à partir d'un modèle 3D. Tout commence donc avec un modèle 3D. Vous pouvez en créer un vous-même ou le télécharger à partir d'un dépôt 3D. Lorsque vous le créez vous-même, vous pouvez choisir d'utiliser un scanner 3D, une application, un dispositif hépatique, du code ou un logiciel de modélisation 3D.

3- Principe de fonctionnement d'une imprimante 3D :

Par superposition ou assemblage des molécules ou filaments d'un matériau, il est possible de donner forme à l'ensemble. Et voilà le secret de l'impression 3D. Imaginez jouer avec des petits morceaux de Lego et les arranger pour donner une forme précise à une nouvelle création. Il est alors possible d'utiliser les modèles fournis par le fabricant ou sur Internet, mais aussi de créer vos propres modèles sur votre ordinateur à l'aide d'un logiciel de modélisation 3D spécialisé. Vous devrez ensuite charger la bobine de fil dans sa fente désignée dans l'imprimante 3D. Ce fichier agit comme l'encre d'une imprimante classique ; il forme le matériau de l'objet créé. Une fois la bobine verrouillée en place, la tête d'impression chaude aspire ce fil pour le faire fondre progressivement, puis créer des couches successives sur la plaque de verre qui descendent peu à peu. C'est l'accumulation de ces couches en hauteur qui forme l'objet final. Les matériaux utilisés dans l'impression 3D sont généralement des thermoplastiques qui fusionnent entre eux lorsqu'ils sont chauffés, ou d'autres matériaux qui durcissent lorsqu'ils sont exposés aux lasers.

Il existe de nombreux types d'impression 3D, mais toutes les imprimantes utilisent le même principe de fonctionnement : faire partie d'une conception CAO ou d'une conception informatique divisée en couches ou feuilles horizontales. L'imprimante « imprime » un calque puis répète le processus au-dessus du calque précédent, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'un objet soit créé [8] :



Figure II.2 : Impression couche par couche [8].

Pour comprendre comment cela fonctionne, vous pouvez imaginer un boulanger faisant un gâteau qui a plusieurs couches de hauteur. Pour faire le gâteau, utilisez le manchon de pâtisserie et recouvrez toute la couche, puis placez une couche de gâteau sur le dessus et répétez le processus. L'impression 3D est la même, aller empiler les couches les unes sur les autres mais automatiquement.

Limitations :



Figure II.3 : Impression couche par couche d'un palmier [8].

Il arrive un moment où l'imprimante doit imprimer les feuilles de palmier. Ces draps n'ont aucun point d'appui car ils sont suspendus à l'envers. Pour pouvoir imprimer cette paume, l'imprimante doit être capable de laisser le matériau flottant dans l'air. Est-ce que toutes sortes d'objets ne peuvent pas être imprimées ? Oui, oui vous pouvez mais vous devez savoir-faire. Pour pouvoir imprimer des objets qui ont des pièces en porte-à-faux, il existe trois astuces :

- **Les structures de soutien :**

Le plus simple est d'ajouter des structures de support. Une sorte d'échafaudage est conçue pour maintenir les pièces en porte-à-faux. Les programmes utilisés pour créer des couches le font automatiquement. L'inconvénient est que vous ajoutez du matériel au processus et que l'impression prend plus de temps. L'inconvénient est qu'il faut alors retirer ces supports et ils peuvent se trouver dans des endroits inaccessibles ou laisser des marques sur l'objet.

- **Orienter l'objet :**

Autrement dit, placez la pièce de sorte que toutes les couches aient toujours le support et soient plus faciles à imprimer.

- **Diviser l'objet :**

Dans ce processus, divisez l'objet en parties et joignez-les une fois imprimées. Il y a des cas où le résultat de l'impression sera bien meilleur de cette manière et les objets avec plus de qualité restent. Vous pouvez voir l'image ci-dessous pour une meilleure compréhension.



Figure II.4 : Orientation et la déviation du palmier [8].

4- Les différents types d'impression en 3D :

Aujourd'hui dans le domaine d'impressions trois dimensions, il existe plusieurs types d'impressions selon le mode de fonctionnement, la vitesse et la matière première. Dans la suite, nous présentons les différents types d'impression en 3d :

4.1 Le dépôt de filament fondu :

Plus connue sous l'acronyme FDM (Fused Deposition Modeling), cette méthode a vu le jour il y a une trentaine d'années grâce à S. Scott Crump, cofondateur de la société Stratasys qui a racheté MakerBot Industries en 2013. FDM étant une marque déposée, d'autres appellations sont utilisées, par exemple Fused Filament Fabrication, utilisé dans la communauté RepRap sous licence libre. Il s'agit du procédé utilisé par une écrasante majorité d'imprimantes 3D dites personnelles. Son principe de fonctionnement est simple : un matériau, souvent présenté sous forme de bobine, passe à travers une buse d'extrusion chauffée entre 170 et 260°C. Il fond et se dépose sur un support par couches dont la finesse varie en fonction du matériel et des réglages (0,02 mm en moyenne). Une fois la première couche terminée, le plateau d'impression descend pour recevoir la seconde et ainsi de suite. Le plateau d'impression peut être chauffé pour pallier la déformation due au choc thermique subi par le plastique, en effet, celui-ci passe de plus de 200°C à la température ambiante quasi instantanément. On peut également trouver des imprimantes FDM dotées de 2 buses d'extrusion. Cela permet entre autres d'imprimer un objet dans deux couleurs différentes ou deux matériaux différents. En plus d'être très abordable, comparée aux autres procédés, la FDM permet d'utiliser une grande variété de matériaux et de couleurs [9].

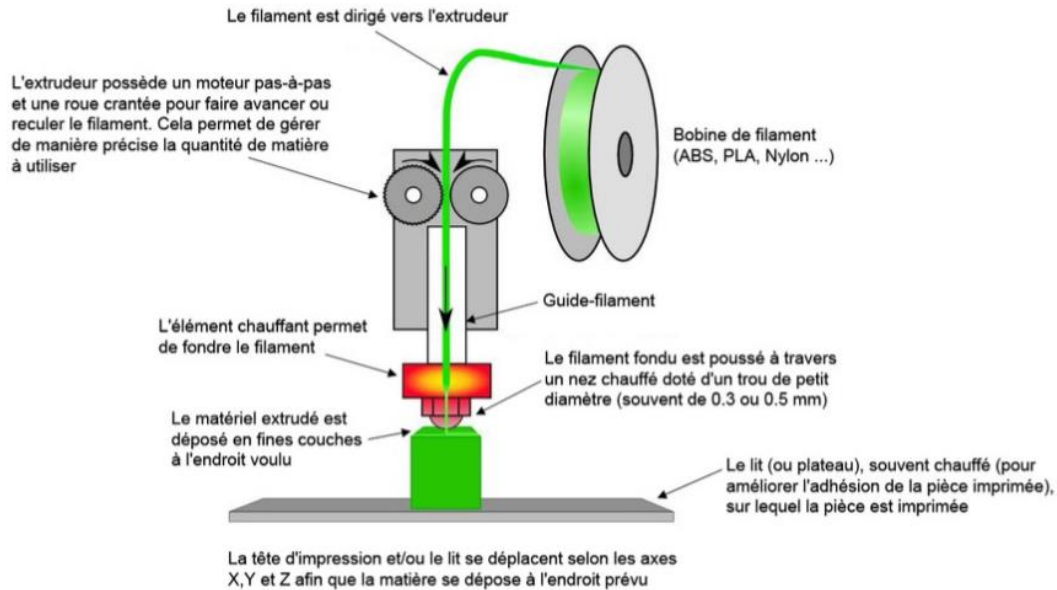


Figure II.5 : Imprimante FDM [9].

4.2 La stéréolithographie (SLA) :

Il s'agit de la première technologie d'impression 3D, apparue en 1986 et mise au point par 3D System. Ici, point de buse ni de fil de plastique, mais un laser ultra-violet et un bac de photopolymère liquide. Comme le système à dépôt de filament, ce procédé imprime couche par couche. Le laser frappe le liquide qui se solidifie sous l'effet des ultraviolets. Un plateau immergé dans le bac supporte le matériau ainsi solidifié et descend, comme pour la FDM, pour passer d'une couche à la suivante [10].

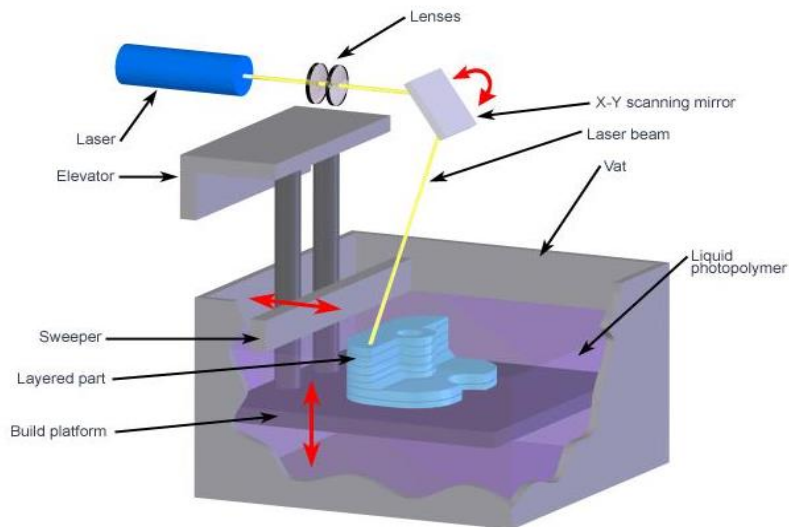


Figure II.6 : Stéréolithographie (SLA) [10].

Une fois l'impression terminée, il faut rincer l'objet pour le débarrasser des restes de photopolymère avec un solvant. L'objet est ensuite passé au four pour le solidifier. Une contrainte qui s'ajoute à la relative lenteur du procédé. Les matériaux utilisables restent assez peu nombreux et malgré la grande précision offerte. Par la SLA, cette technique délivre des objets relativement fragiles. Elle se limite donc à du prototypage plutôt qu'à la production d'objets.

4.3 Le frittage laser (SLS) :

À l'instar de la SLA, le procédé SLS utilise un laser. En revanche, la différence se situe au niveau du matériau, qui n'est plus liquide, mais sous forme de poudre de plastique, de céramique, de verre ou de métal ; pour ce dernier, on parle de DMLS (Direct Métal Laser Sintering). Là aussi, on trouve un bac qui contient le matériau (la poudre), mais c'est un rouleau qui vient déposer une fine couche (0,1 mm) sur la plateforme d'impression. Le laser entre alors en action pour solidifier la première couche, puis l'opération se répète pour chaque couche. Une fois le processus terminé, on retire l'objet puis on le débarrasse des restes de poudre non fusionnée.

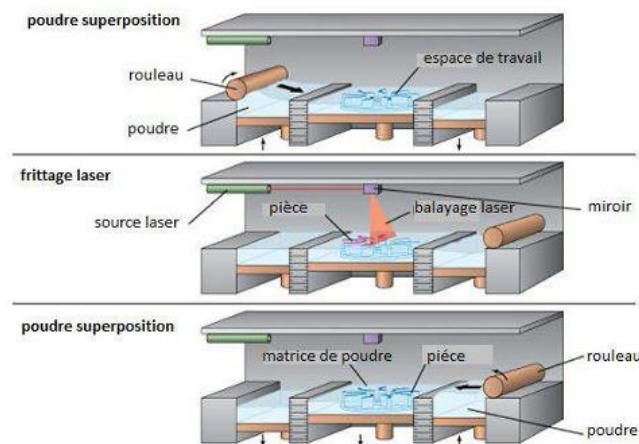


Figure II.7 : Frittage laser (SLS) [10].

L'avantage de cette technologie est qu'il y a très peu de déchet et que la poudre non fusionnée peut être réutilisée par la suite. En revanche, le SLS demande une poudre aux grains homogènes et un réglage très précis du laser.

4.4 Le procédé poly jet :

Breveté par la société Objet en 1999, le procédé dit Poly Jet s'appuie sur la photo polymérisation, tout comme le SLA. Ici, des jets de matériau sont projetés sur le support d'impression. Ceux-ci correspondent là encore aux couches définies par le logiciel d'impression.

Après chaque jet, le polymère est solidifié grâce à un rayon UV. Avantage certain de cette technologie, elle ne nécessite pas de post-traitement, comme le ponçage ou le rinçage. Il est également possible d'adjoindre au matériau d'impression un deuxième matériau de support qui se dissout dans l'eau [11].

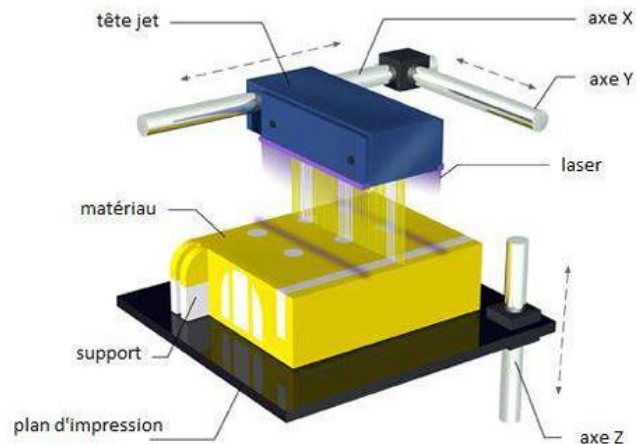


Figure II.8 : Procédé poly jet [11].

4.5 Le procédé DLP :

Développé pour des travaux nécessitant une grande précision, comme la bijouterie ou la fabrication de prothèses, le procédé DLP s'appuie sur la même technologie que celle qui est embarquée dans bon nombre de vidéoprojecteurs. Le principe est similaire à la SLA, dans le sens où la lumière est utilisée pour solidifier un polymère liquide. Une puce composée d'une matrice de miroirs orientables, parfois plusieurs millions, réfléchit une lumière UV et projette une sorte d'image.

Correspondant à la forme de la couche à imprimer. Cette lumière vient donc frapper le polymère qui se trouve dans un bac pour le solidifier. Le traitement se fait couche par couche, comme dans le cas du SLA. L'avantage du procédé DLP sur la stéréo lithographie est sans conteste la rapidité. En effet, une couche peut être solidifiée à chaque projection de lumière. Seul UN déplacement vertical de la platform est nécessaire [12].

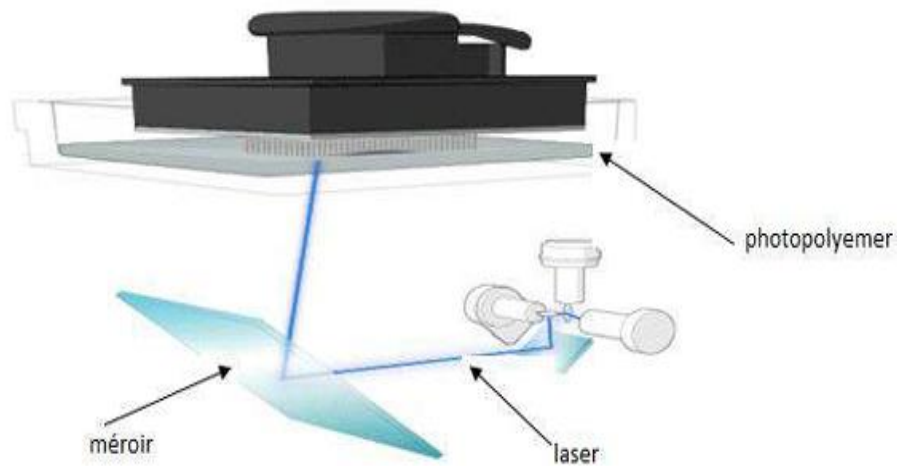


Figure II.9 : Procédé DLP [12].

5- Le composant d'imprimante 3D :

L'imprimante 3D à dépôt de filament fondu est une machine qui permet d'imprimer des objets en trois dimensions, à partir de diverses matières, et selon différents procédés, cet appareil est constitué de glissières pour assurer le guidage des éléments, des courroies et des tiges filetées pour assurer la transmission et des vis pour la fixation de toutes les pièces ; et voilà le schéma qu'on veut réaliser

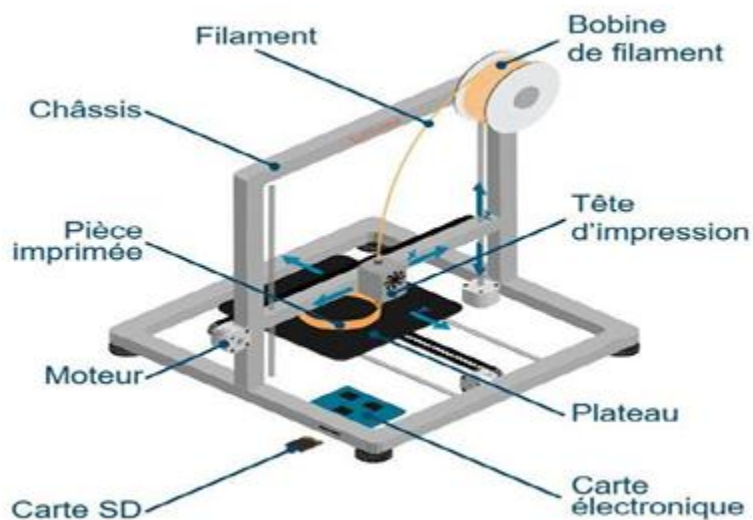


Figure II.10 : Schéma d'une imprimante 3D à dépôt de filament fondu [12].

Extrudeuse :

C'est un mécanisme composé de plusieurs pièces et son principe de fonctionnement est de diriger le fil vers la buse de chauffage pour le faire fondre pendant la fabrication. La tête d'impression est le mécanisme le plus important dans une imprimante. Les millimètres fins exigent une grande précision lors du déplacement pendant l'impression. Par conséquent, il ne devrait y avoir aucun frottement ou vibration pendant l'utilisation. En impression, la partie mécanique de la machine est la plus importante pour assurer cette précision sur l'axe du mouvement. L'extrudeuse est un sous-système qui force les filaments dans l'extrémité chaude. À l'intérieur de l'extrudeuse se trouve un moteur, généralement un moteur pas à pas. Il existe différentes stratégies pour y parvenir, mais nous essayons généralement de les transmettre par friction. Le point chaud est la zone où le fil se dissout. Le fil y est forcé par l'extrudeuse et, une fois fondu, il est forcé à travers la buse. Il y a 3 zones significativement différentes dans le « Hot Carter » :

1. **Zone chaude :** c'est la zone échange d'énergie entre la partie chaude et le filament. Le but est de s'assurer que le transfert de chaleur est le plus efficace possible et d'obtenir un flux de chaleurs stable.
2. **Zone froide :** c'est la zone où le filament est guidé vers la zone terminale chaude. Il est important qu'il soit aussi froid que possible, c'est pourquoi il est généralement refroidi par convection d'air forcée.
3. **La zone de transition :** c'est la zone située entre la zone chaude et la zone froide. Il est important que la zone de transition thermique soit le plus petit possible pour que le gradient de température soit très agressif. De cette façon, nous pouvons nous assurer que le matériau ne fait pas ou ne se ramollit pas avant d'atteindre la zone chaude. Lorsque le matériau commence à se ramollir, sa viscosité augmente, ce qui peut entraîner un échec de l'impression, car l'extrusion du filament nécessite plus de pression et le mécanisme de l'extrudeuse n'atteint pas toujours ce point.



Figure II.11 : Composantes de l'extrudeuse [12].

Avec :

1. Moteurs pas à pas.	2. Buses à pas doux.	3. Bloc chauffant progressif.	4. Guides pas à pas.	5. Résistance pas à pas.	6. Ventilateur pas à pas.	7. Radiateur pas à pas.	8. Pignon moteur pas à pas.	9. Palier à gradins.
-----------------------	----------------------	-------------------------------	----------------------	--------------------------	---------------------------	-------------------------	-----------------------------	----------------------

1. Moteur pas à pas :

Le moteur est la source de la force qui pousse les fils pour être contrôlée. Grâce à ce dernier, on peut contrôler la quantité de matière injectée.

2. Buses à pas doux :

Joue un rôle clé dans le résultat final. Sa taille et son diamètre, ainsi que le matériau utilisé pour sa fabrication, ont un impact direct sur la précision, la finesse et la vitesse d'impression. C'est la tête d'impression, la sortie de la buse est le point où le plastique fondu sort et se dépose sur la pièce. Plus le diamètre de la buse d'extrémité chaude est grand, plus il est possible d'extruder les filaments sous la même pression appliquée par le système d'extrusion. Plus le débit binaire est élevé, plus la hauteur de couche peut être élevée, mais plus la résolution finale obtenue est faible. Le diamètre de buse le plus courant est compris entre 0,4 et 0,6 mm. Pour les pièces de haute résolution, avec le FDM, on peut descendre jusqu'à 0,2 mm. Et pour les pièces de grand volume, il est courant de trouver des buses allant jusqu'à 1,0 mm.

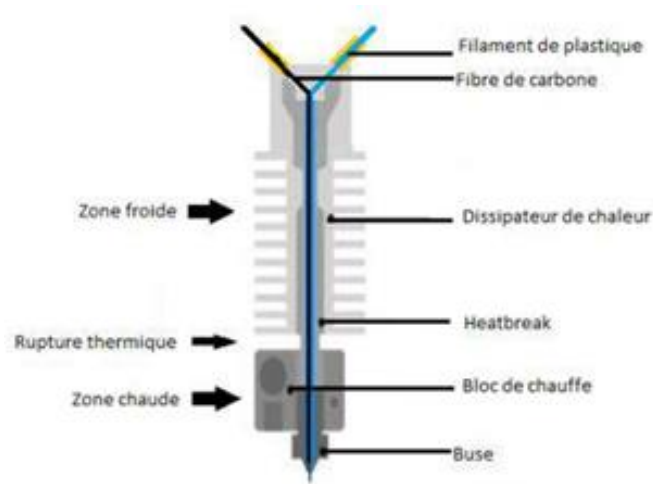


Figure II.12 : Schématisations de la buse [12].

Le matériau utilisé pour la fabrication de chaque partie doit être en adéquation avec son rôle. Pour la zone de transition, un matériau à très faible conductivité thermique est nécessaire, comme l'acier inoxydable ou le titane. Pour la zone chaude, on utilise généralement des matériaux ayant une bonne conductivité thermique et faciles à usiner, tels que l'aluminium et le laiton. Dans les buses plus sophistiquées, le cuivre peut également être utilisé. Pour les applications où l'impression avec des matériaux abrasifs est nécessaire, la buse est généralement revêtue ou faite de matériaux plus durs comme l'acier ou le carbure de Tungstène, qui sont traités en surface. Dans le cas de notre imprimante, la buse utilisée devra être en acier trempé puisqu'elle utilise le filament de carbone qui est entouré d'abrasif. Pour la zone froide, il faut des matériaux ayant une bonne conductivité thermique. L'aluminium est généralement utilisé.

3. Bloc chauffant progressif :

Fabriqué en aluminium et contient une résistance qui chauffe le bloc à la température de fusion du fil. La chaleur de fusion reste constante dans le bloc, c'est là que le plastique fond.

4. Guide pas à pas :

Ce sont des tubes en plastique qui guident les filaments.

5. Résistance pas à pas :

Chauffer le bloc chauffant, serrer le fil et le pousser vers la buse.

6. Ventilateur pas à pas :

Utilisé pour refroidir le fil (s'il chauffe, le fil glissera) et pour refroidir le moteur.

7. Radiateur pas à pas :

Relâchez la température du moteur et des fils vers l'extérieur.

8. Pignon moteur pas à pas :

Relié au moteur, le pignon moteur saisit le fil et le pousse vers la buse.

9. Palier à gradins :

Parallèle au pignon d'entraînement, utilisé pour tendre le fil et le pousser vers la buse.

Tendez le fil et poussez-le vers la buse. L'ensemble composé de cette roue dentée motorisée et de la buse chauffante qui fait le filament.

6- Les matériaux utilisés dans l'impression :**6.1 PLA (Acide poly lactique) :**

Le PLA est le consommable le plus couramment utilisé pour les imprimantes personnelles à dépôt de fil. Ecologique car d'origine végétale (amidon de maïs, racine de manioc et betterave) ce plastique biodégradable et non toxique, il dégage une légère odeur sucrée pendant son impression. Si le PLA est pur et que l'extruder de l'appareil est en acier inoxydable, alors celui-ci peut être utilisé pour imprimer des objets destinés à être en contact avec des aliments tels que des bols ou des tasses par exemple [13].



Figure II.13 : Filament de PLA [13].

6.2 ABS (acrylonitrile butadiène styrène) :

Fabriqué à base de pétrole, L'ABS qui est soluble dans l'acétone permet de souder les pièces métalliques avec une goutte ou deux, ou de lisser et créer un effet brillant par brossage ou trempage pièces entières dans l'acétone. Sa force, sa souplesse et sa meilleure résistance à la température font de lui le matériau préféré pour les ingénieurs, et les applications professionnelles.



Figure II.14 : Filament d'ABS générique [13].

6.3 La poudre de polyamide :

Ce matériau est notamment utilisé pour imprimer des prototypes en plastique blanc, selon un procédé d'impression 3D par frittage laser. Cette technique se repose sur l'utilisation d'un faisceau laser qui vient sculpter votre objet en fusionnant les grains qui se solidifient sous l'effet de la chaleur.



Figure II.15 : Poudre de polyamide.

6.4 La poudre d'alumide :

L'alumide est un mélange de polyamide et d'aluminium. Ce matériau offre l'avantage de pouvoir réaliser des pièces à la fois très solides et très flexibles avec une importante résistance à la chaleur.

6.5 La résine liquide :

La résine est un polymère liquide photosensible. L'impression avec ce matériau consiste en un dépôt successif de couches qui sont immédiatement solidifiées par UV. La pièce prend alors les allures d'une pièce plastique rigide et lisse.



Figure II.16 : Résine liquide.

6.5 Acier inoxydable :

Plus connu sous l'appellation « d'inox », l'acier inoxydable a été le premier métal à être commercialisé pour la fabrication additive. Comme son nom le suggère il possède des propriétés mécaniques de haute résistance à la corrosion.

6.6 Le titane :

Les pièces imprimées à partir de titane ou de ses alliages sont réputées pour leur légèreté, leur solidité et leur résistance à la corrosion très élevée



Figure II.17 : Titane.

6.7 L'aluminium :

Il est le plus souvent utilisé pour la fabrication de moules à parois fines et aux géométries complexe. Il existe aussi l'alumide, une poudre à base de polyamide et d'aluminium. Il offre l'avantage de pouvoir réaliser des pièces à la fois très solides et très flexibles avec une importante résistance à la chaleur.



Figure II.18 : Aluminium.

6.8 Le bois :

Sous la forme de filament, le bois est utilisé dans de nombreuses technologies de l'impression 3D. Il ne s'agit pas de bois brut mais de bois composite, matériau composé de fibres de bois et de résine de polymère. Très utilisé pour l'habillage et l'isolation de bâtiment et de mobilier extérieur, ce matériau souple a aussi l'avantage d'être en partie fabriqué en bois recyclé. Le bois composite, ou WPC pour Wood-plastic composite en Anglais, résiste aux intempéries, au soleil et ne pourrie pas avec le temps. De plus, il ne nécessite pas d'entretien particulier comme le demanderait du vrai bois



Figure II.19 : Bois.

6.9 Le béton :

Le béton avec sa grande capacité a résisté à la compression et surtout la capacité à modifier ces caractéristiques rhéologique le béton et le meilleur matériau à faire imprimer les habitations et ces pièces.



Figure II.20 : Béton.

7 Les domaines d'application de la technique d'impression 3d : [14]

7.1 Le domaine médical :

Le domaine médical a été un des premiers à adopter l'impression 3D comme alternative aux techniques de fabrication traditionnelles pour les instruments et équipements médicaux et paramédicaux, en raison des options de personnalisation et d'amélioration de la vie des gens, à mesure que ces processus sont modernisés et que les matériaux sont développés. Les technologies d'impression 3D sont utilisées dans diverses applications, telles que le prototypage dans le secteur médical et dentaire, la création de moules pour couronnes dentaires et d'outils pour la fabrication d'orthodontie ; nous personnalisons également la fabrication des aides auditives, des semelles orthodontiques, des prothèses personnalisées, et des implants uniques. Les développements de cette technologie ont également permis d'imprimer en 3D la peau, les os, les tissus, les médicaments et même des organes humains. Cependant, ces technologies sont encore loin d'être commercialisées.

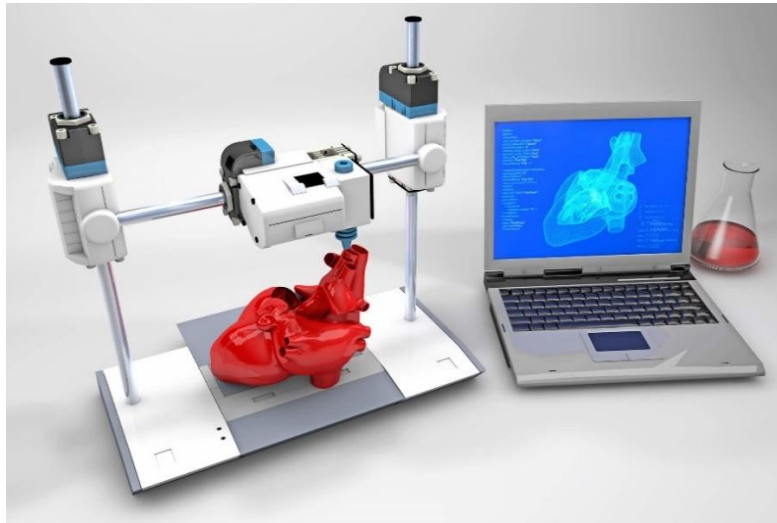


Figure II.21 : Cœur humain a été imprimé 3D [14].

Les imprimantes 3D aident le secteur médical de trois manières principales :

- Amélioration des résultats pour les patients
- Économies de temps et d'argent
- Accélération du cycle de recherche et de développement

7.2 Domaine d'aéronautique et aérospatiale :

L'industrie aérospatiale est sans doute le plus grand utilisateur de l'impression 3D en raison de sa capacité à répondre à de nombreux besoins de l'industrie, notamment la production de moules, de noyaux de sable imprimés pour des prototypes et la production de pièces moulées et de composants métalliques imprimés en utilisant du nickel sous forme de superalliages. De plus, l'impression 3D permet d'économiser du poids pour les pièces en plastique et offre une meilleure isolation électrique. L'utilisation de matériaux thermoplastiques est une solution idéale pour la fabrication de composants d'avions, en raison de leur poids léger et de leur résistance à la chaleur. À l'heure actuelle, de grands groupes industriels tels qu'Airbus, Boeing, General Electric et bien d'autres ont déjà commencé à utiliser la technologie d'impression 3D pour améliorer leur productivité et réduire leurs coûts de production.

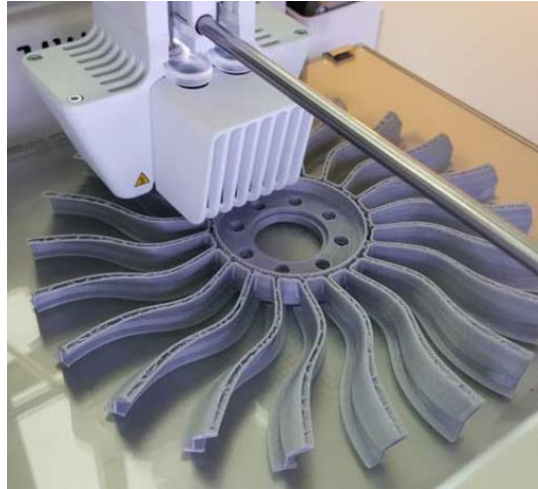


Figure II.22 : L'utilisation de l'impression 3D pour imprimer une pièce d'avion [14].

7.3 Domaine d'automobile :

L'industrie automobile a également bénéficié de l'impression 3D, l'utilisant pour le prototypage rapide des moteurs et des composants du moteur, des capots de transmission et pratiquement tous les autres composants. Pour cette raison, les concepteurs du secteur se sont tournés vers l'impression 3D pour un prototypage et une fabrication plus rapide.



Figure II.23: Une pièce motrice imprimée complètement en 3D [14].

7.4 Domaine alimentaire :

L'industrie alimentaire a également commencé à s'intéresser à l'impression 3D, en particulier avec les meilleurs chefs et artistes créant des sculptures en chocolat ou même en pâte à sucre. Même la NASA suit de près les développements des technologies d'impression 3D. En fait, une imprimante de nourriture 3D représenterait un gain d'espace important lors des missions

spatiales. Ainsi, il est devenu possible de pourvoir aux besoins des astronautes, et des tests d'impression de pizza ont également été effectués.

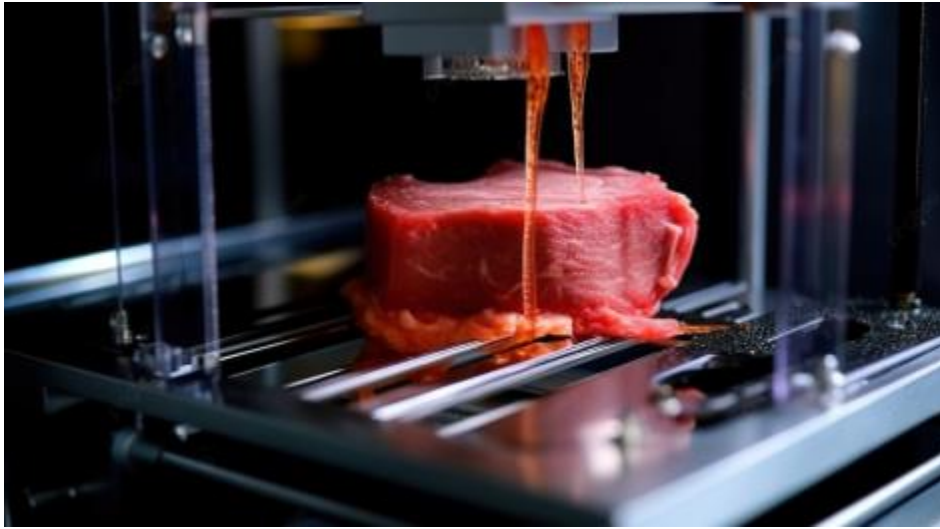


Figure II.24 : Morceau de viande imprimé 3D [14].

7.5 Domaine d'architecture :

Une imprimante 3D permet aux cabinets d'architecture, aux bureaux d'études ou aux studios d'aller de l'avant rapidement en créant des modèles puissants et complexes à partir de données CAO provenant de logiciels d'architecture ou de conception. Les modèles d'impression 3D sont lisses et produisent des modèles détaillés dans une large gamme de matériaux, y compris les photopolymères, y compris les solides prêts pour le revêtement. L'application de la fabrication additive dans ce domaine permet de réduire significativement le temps et les coûts pour la production de modèles qui nécessitent souvent des détails très fins imprimés en 3D et qui sont également plus résistants que les modèles conventionnels.

Et dernièrement on assiste à une avancée dans le domaine de construction non seulement le prototypage, mais la construction à échelle réelle, ce qui donne une certaine liberté de design aux architectes vu la capacité de l'impression 3D de construire des formes complexes sans avoir besoin ni de savoir-faire particulier ni de coffrages spéciaux.



Figure II.25 : Une maison totalement imprimée en 3D [14].

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une définition claire de l'impression 3D, accompagnée d'un aperçu de son évolution historique. Nous avons ensuite exploré les principaux domaines d'application de cette technologie, ainsi que les différents matériaux couramment utilisés. Enfin, nous avons analysé les diverses technologies d'impression 3D existantes, en mettant en évidence leurs différences fondamentales et leurs champs d'application respectifs.

Chapitre -III-

Partie expérimentale

Après avoir abordé dans les deux chapitres précédents les aspects théoriques liés respectivement à la machine à mesure tridimensionnelle (MMT) et la technologie de l'impression 3D, nous passons dans ce chapitre à la partie pratique de ce travail. Nous avons conçu une pièce mécanique à l'aide du logiciel de conception assistée par ordinateur CATIA, puis nous l'avons préparée pour l'impression à l'aide du logiciel CURA, avant de la fabriquer concrètement à l'aide d'une imprimante 3D.

Dans l'étape suivante, la pièce a été soumise à une mesure géométrique précise à l'aide d'une machine de mesure tridimensionnelle, afin de vérifier ses dimensions et les comparer aux valeurs théoriques issues de la conception.

Ce chapitre a pour objectif de présenter toutes les étapes réalisées au cours de ce travail pratique, de la conception à l'analyse, ainsi que le résultat obtenu, qui seront discutés dans le but de faire évoluer la précision et la qualité de l'impression 3D d'un point de vue géométrique.

1. Conception de pièce à l'aide du logiciel CATIA :

La phase de conception représente l'étape fondamentale de ce travail pratique, où nous avons créé un modèle d'une pièce mécanique en utilisant le logiciel de conception 3D CATIA V5, reconnu pour ses puissantes capacités en modélisation solide et en assemblages mécaniques.

Nous avons opté pour une conception relativement simple, comportant des formes géométriques variées telles que des surfaces planes, cylindriques et des trous, dans le but de faciliter ultérieurement la vérification de la précision géométrique lors de la mesure.

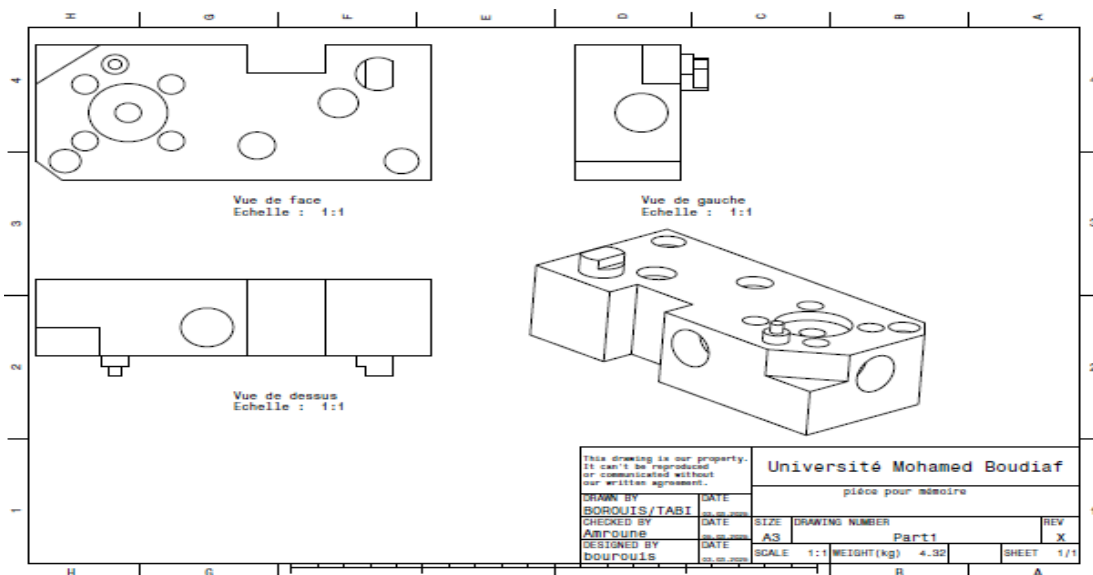


Figure III.1 : Conception de pièce par logiciel CATIA.

Tout d'abord nous déterminons la longueur et extrude de la pièce :

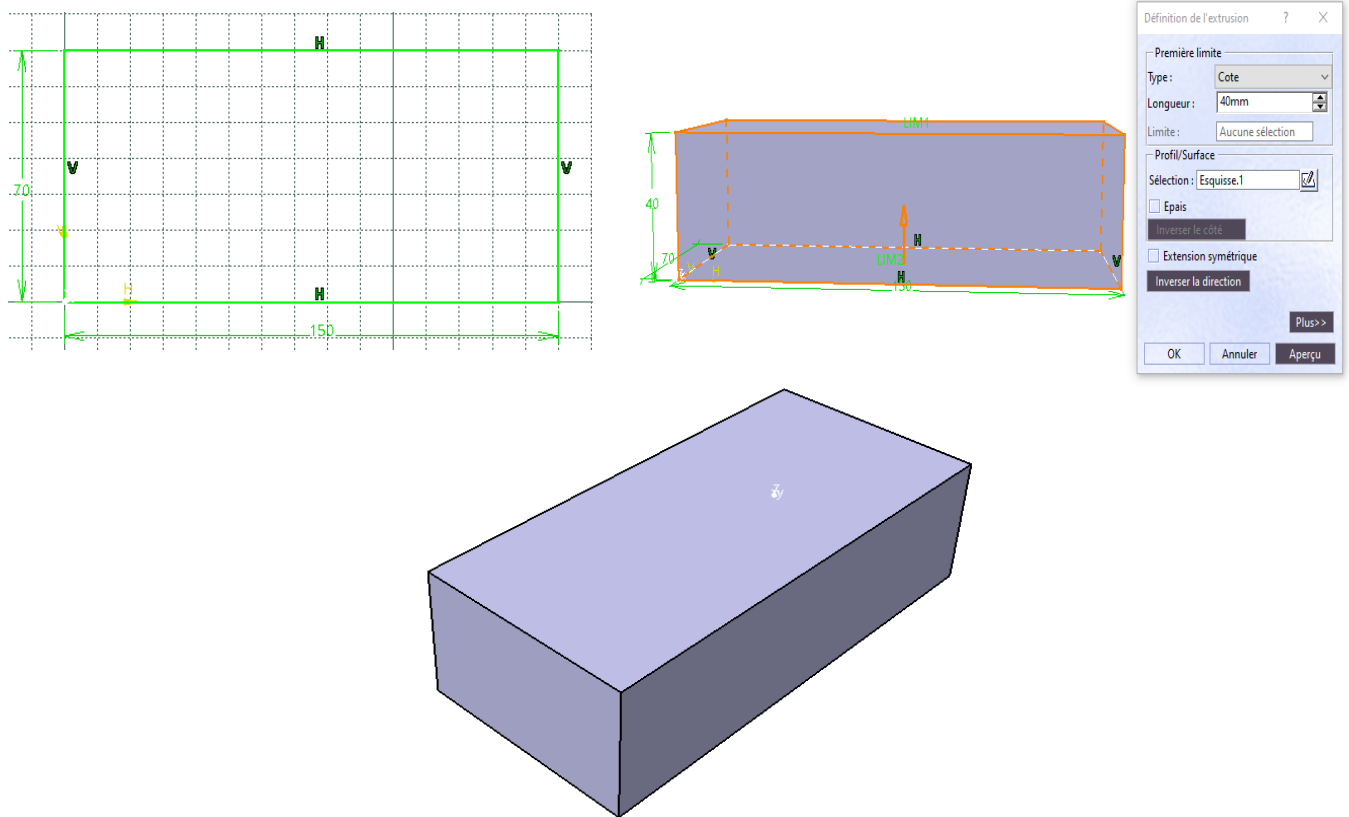


Figure III.2 : Conception initiale de la pièce.

Ensuite, nous réalisons un chanfrein :

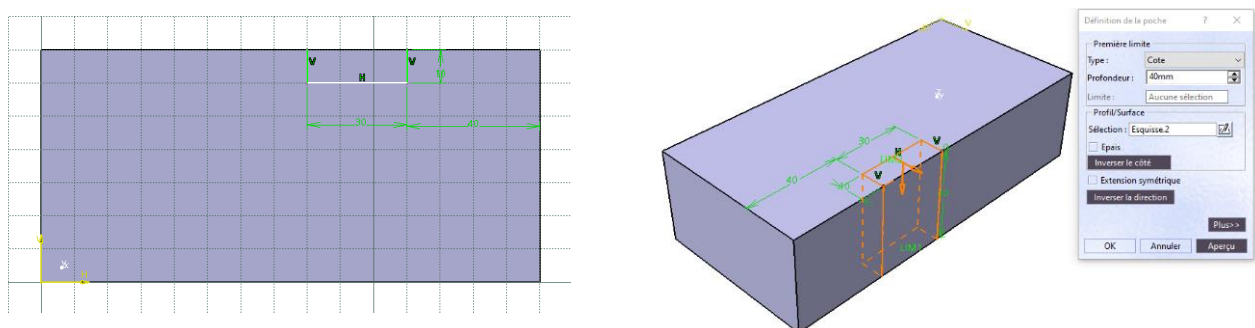


Figure III.3 : Définir un chanfrein sur la pièce.

Ensuite nous dessinons des cercles pour la pièce :

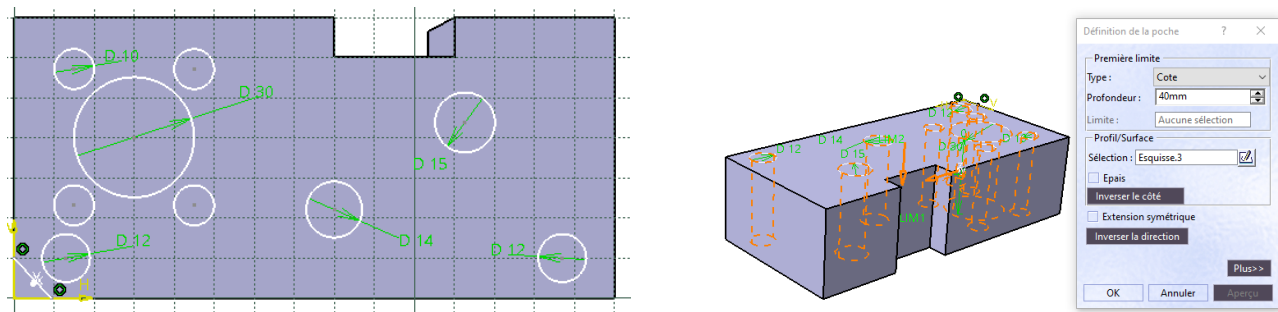


Figure III.4 : Dessiner des cercles sur la pièce.

Ensuite nous complétons le reste du dessin sur la pièce, et nous obtenons le modèle suivant :

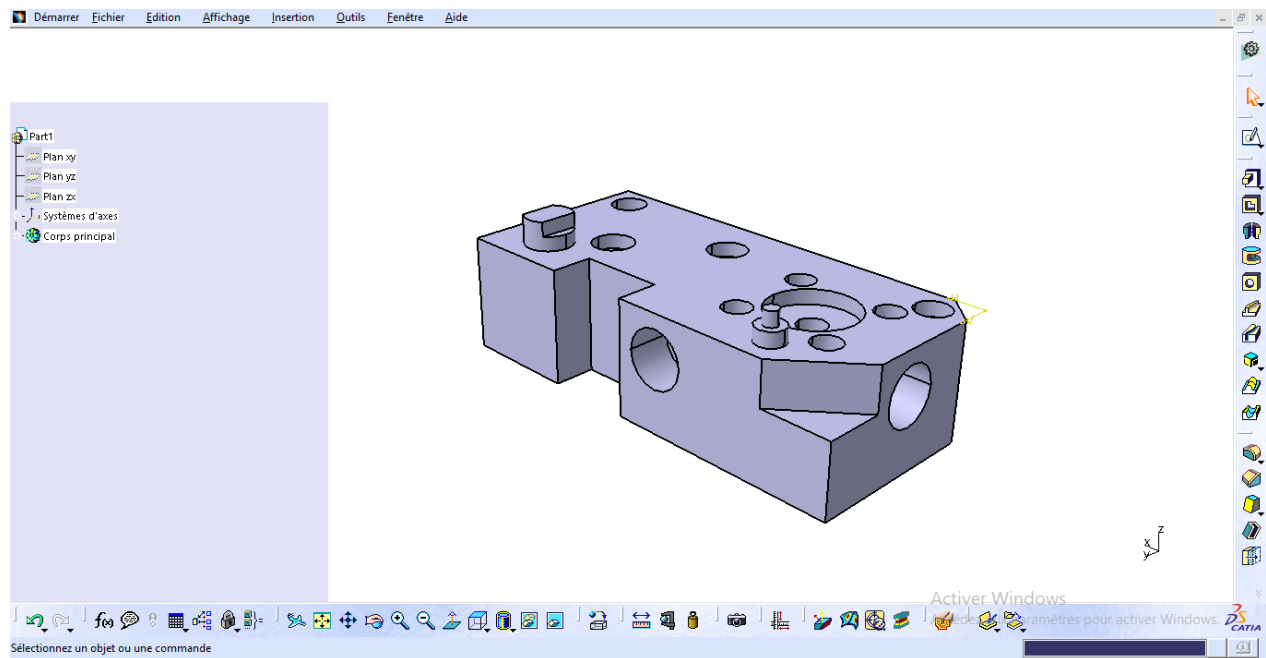


Figure III.5 : La pièce finale.

Une fois la conception terminée, le modèle a été enregistré au format **STL**, qui est le format standard permettant de convertir le modelé numérique en un fichier imprimable sur une imprimante 3D.

2- impression 3D à l'aide du logiciel CURA :

Après avoir terminé la conception de la pièce sur le logiciel CATIA, le fichier a été converti au format STL afin d'être traité via le logiciel Ultimaker Cura, qui est utilisé pour préparer un modèle 3D à l'impression

A cette étape, les paramètres d'impression ont été réglés avec précision.

Après ouverture le logiciel du Cura

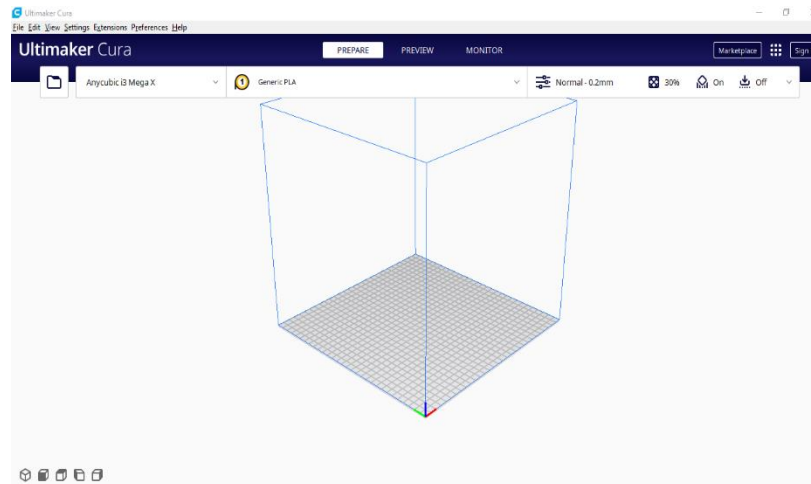


Figure III.6 : Interface du programme CURA.

L'interface principale s'affiche, présentant les paramètres d'impression, le type de matériau, ainsi que le type de machine d'impression.

Cette étape est essentielle pour garantir une impression correcte. Nous chargeons ensuite le fichier de la pièce, Préalablement enregistré au format STL. Une fois le fichier ouvert, la pièce apparaît dans l'espace de travail du programme.

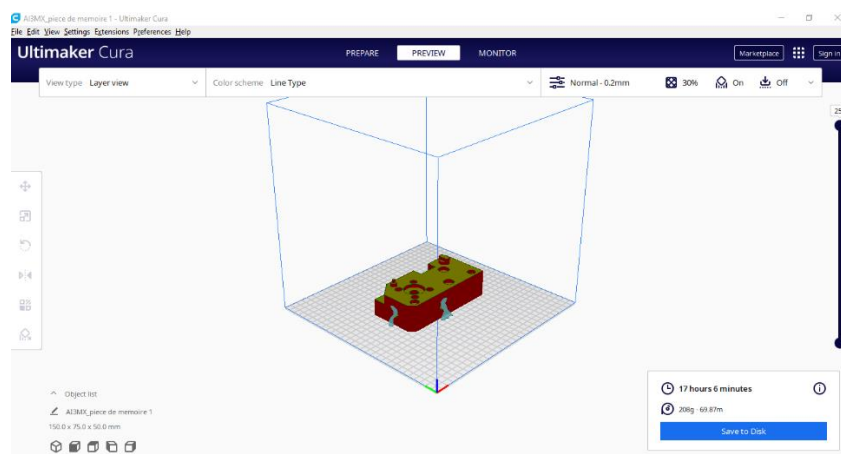


Figure III.7 : Insertion de la pièce dans le logiciel CURA.

Nous sélectionnons ensuite le type de machine d'impression à utiliser, puis le matériau d'impression en l'occurrence, le PLA. Grace aux réglages nécessaires tels que la température de la buse, la vitesse d'impression, le remplissage. La hauteur de couche, et le support si nécessaire afin d'optimiser la qualité de l'impression finale :

- **type de machine** : Anycubic I3 Méga X
- **matériaux** : PLA (plastique)
- **paramètres d'impression** :

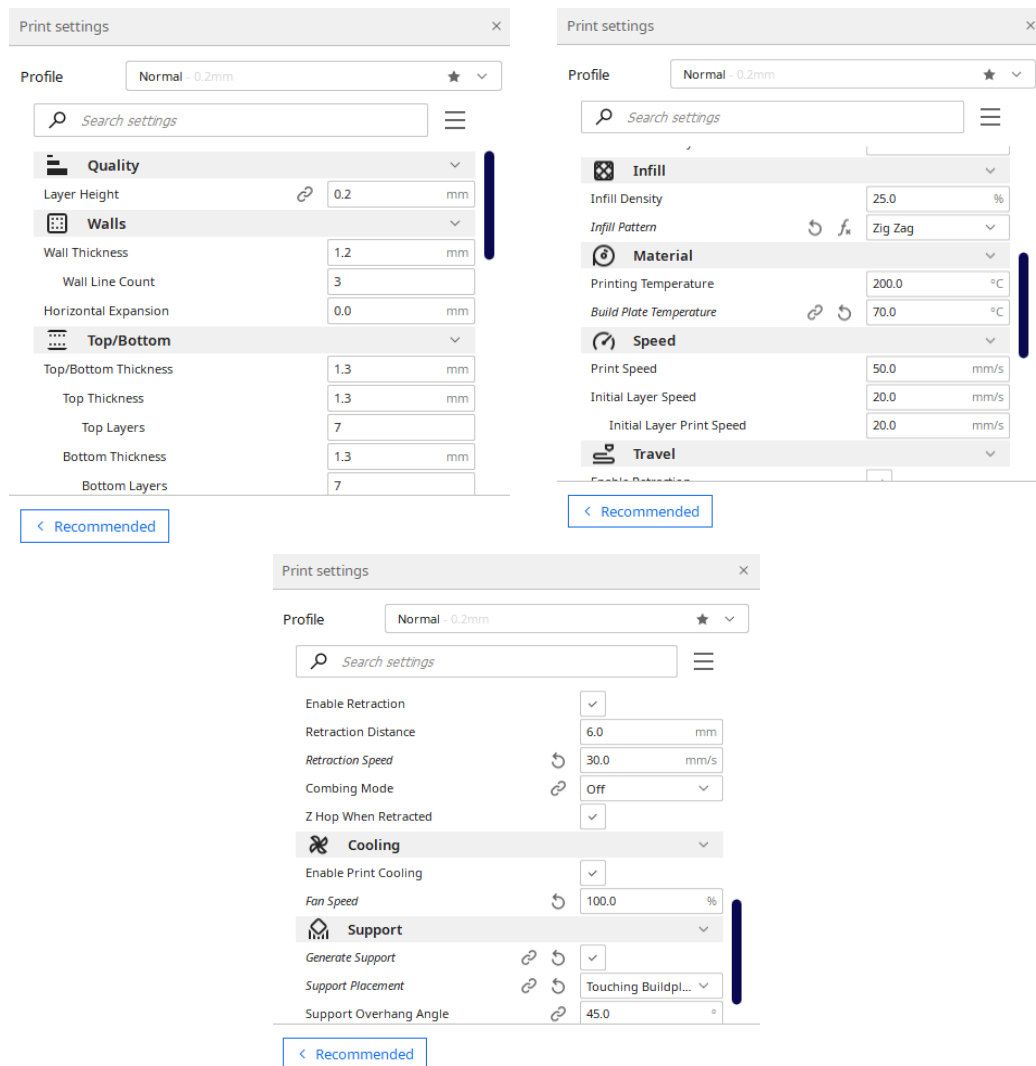


Figure III.8 : Paramètres d'impression des pièces.

Une fois le fichier préparé, il a été enregistré au format G-Code puis envoyé à l'impression 3D de type [Anycubic i3 Méga X]. L'impression a duré environ [17 hours 7 min] et s'est déroulée avec succès, la pièce imprimée était quasiment conforme au modèle.



Figure III.9 : Étapes d'impression avec une machine à imprimer.

Au cours de l'impression, plusieurs défauts ont été observés, notamment des irrégularités liées à la température d'impression. La pièce présentait des bosses ainsi que qu'une texture de surface et finitions. Ces problèmes sont fréquents lors de l'impression avec du PLA et nécessitent de ventilation, de vitesse d'impression ou de température pour être corrigés

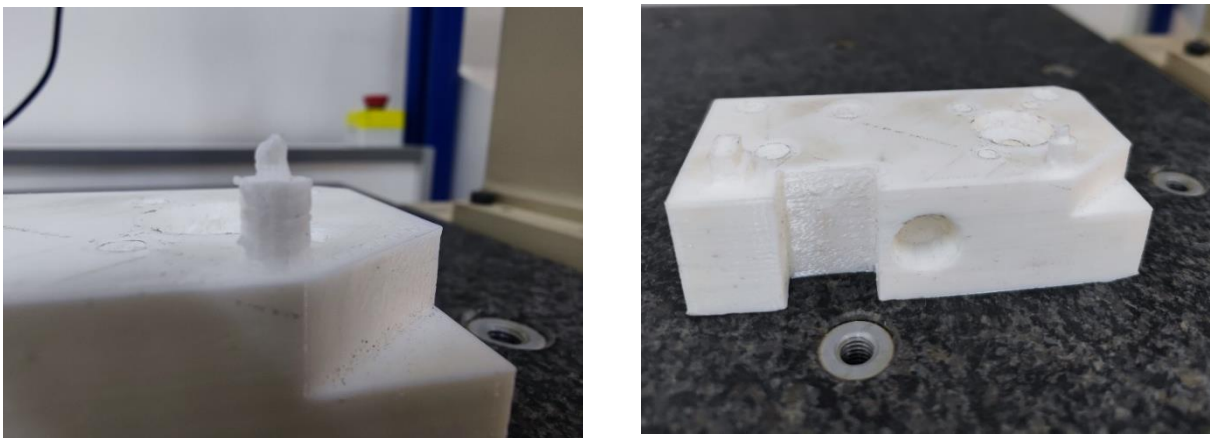


Figure III.10 : Pièce finale après l'impression.

3- Fabrication de la pièce en aluminium :

Lors du contrôle de précision de la pièce fabriquée par impression 3D, des déviations géométriques notables ont été constatées, dues à l'hétérogénéité du matériau (PLA) et à la possibilité de déformations pendant l'impression. Suite à ces constats, il a été décidé de reprendre l'expérience en utilisant une autre pièce fabriquée en aluminium, matériau reconnu pour sa stabilité et la précision de ses dimensions après fabrication.

La nouvelle pièce a été conçue avec des dimensions modifiées, tout en conservant les mêmes références géométriques que la précédente, ce qui a permis de répéter le processus de mesure sur la machine de mesure tridimensionnelle (MMT) selon la même méthodologie.

Les étapes de fabrication de la pièce en aluminium étaient les suivantes :

1- Nous nous sommes rendus à l'usine d'aluminium ALGAL+, plus précisément au centre de recyclage, où nous avons découpé une portion d'une billette d'aluminium. Cette portion a ensuite été transportée vers le site de fabrication



Figure III.11 : Préparation de la pièce brute en aluminium.

2- La partie découpée a été fixée, puis ajustée à des dimensions approximatives à l'aide d'une scie



Figure III.12 : Couper la pièce brute.

3- Une ébauche rectangulaire en aluminium a été soigneusement serrée et centrée dans un mandrin à quatre mors indépendants sur un tour, en vue de l'usinage



Figure III.13 : début de la fabrication en installant la pièce en aluminium.

4- Une fois la forme de base obtenue, nous avons déterminé le centre du cercle sur les quatre faces de la pièce

5- La pièce a ensuite été fixée solidement sur la table de la machine afin d'éviter tout déplacement lors de l'opération de fraisage.

6- À l'aide d'une fraise cylindrique, une partie du matériau a été retirée, permettant la formation progressive d'un profil en marches.



-A-



-B-



-C-

Figure II.14 : Identification du chanfrein sur la pièce-A-
 Identification de cercle sur la pièce -B-
 Identification de l'angle sur la pièce -C-

7- Nous avons également usiner les pièces restantes à l'aide d'une machine CNC, avec une programmation adaptée à une fabrication automatisée et précise afin que

Usinage final sur centre CNC F-VMC 510L (commande Siemens SINUMERIK 828D) après la phase de conception et la préparation initiale de la pièce, la dernière étape de fabrication a été réalisée à l'aide d'une machine-outil à commande numérique CNC, modèle F-VMC 510L de la marque Pearl River, équipée d'une commande numérique Siemens SINUMERIK 828D.

La pièce a été d'abord positionnée sur l'étau de la table de la machine. Une opération de prédécoupé et de perçage initial a été réalisée pour préparer la géométrie générale.

Ensuite, un repérage des origines selon les axes X, Y et Z a été effectué afin de définir l'origine pièce à la position (0, 0, 0). Cette opération de Référencement est essentielle pour garantir la précision du programme d'usinage.

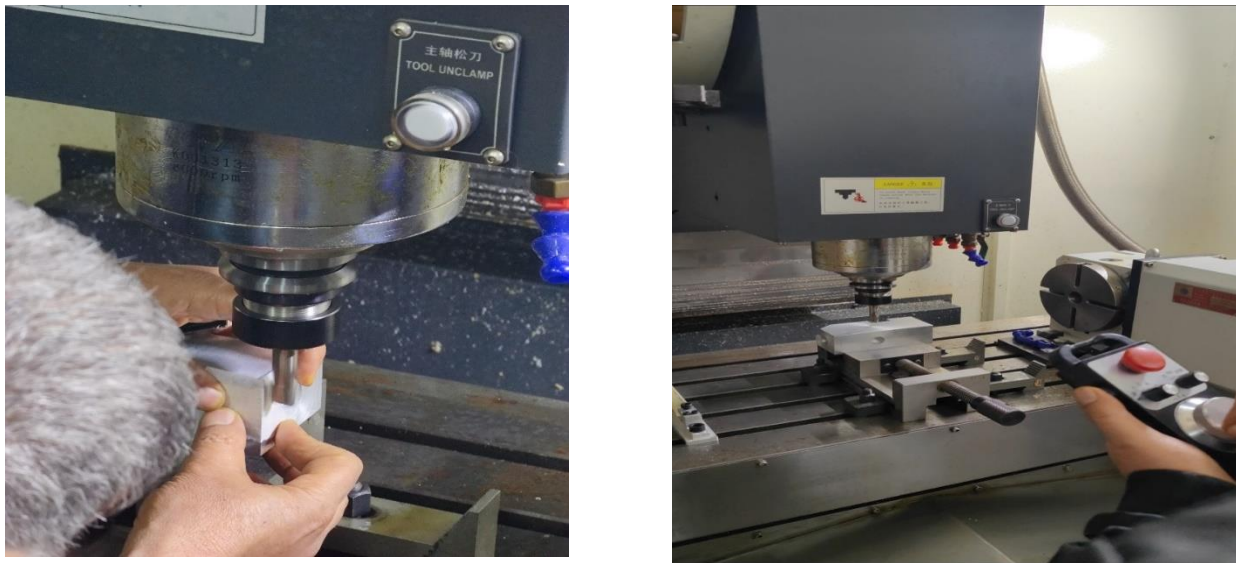


Figure III.15 : Installer et définir la référence de la pièce à l'intérieur de la machine CNC.

Une fois le point zéro défini, la machine a été remise en position initiale. À partir de là, les paramètres principaux du programme d'usinage ont été saisis dans la commande Siemens. L'usinage a ensuite été lancé en suivant les instructions du programme, débutant par des formes circulaires, puis s'étendant à d'autres entités géométriques complexes, tout en respectant les références de coordonnées définies précédemment.

```

N5 WORKPIECE (,"",,"BOX",0,0,-50,-80,0,0,-150,70)
N10 G17 G90 G58
N15 T="81" D1
N20 M6
N25 S 1000 F200 M3

CYCLE62 ("OBLIQ",1,,)
CYCLE72 ("",100,0,2,20,1,0,0,600,500,1,42,1,5,0.1,1,5,0,1,2,101,1011,101)
M30
E LAB A OBLIQ: ;#SM Z:2
;#7 DlgK contour definition begin - Don't change!;*GP*;*RO*;*HD*
G17 G90 DIAMOF;*GP*
G0 X-150 Y10 ;*GP*
G1 X-140 Y0 ;*GP*
;CON,0,0.0000,1,1,MST:0,0,AX:X,Y,I,J,TRANS:1;*GP*;*RO*;*HD*
;S,EX:-150,EY:10;*GP*;*RO*;*HD*
;LA,DEX:10,DEY:-10;*GP*;*RO*;*HD*
;#End contour definition end - Don't change!;*GP*;*RO*;*HD*
E LAB E OBLIQ:
POCKET4(100,-5,1,5,10,-
115,35,1,0,0,300,0.1,0,21,10,9,15,2,2,0,1,2,10100,111,111)
POCKET4(100,0,1,5,10,-
98.58,20.36,1,0,0,300,0.1,0,21,10,9,15,2,2,0,1,2,10100,111,111)
POCKET4(100,0,1,5,10,-
98.58,49.64,1,0,0,300,0.1,0,21,10,9,15,2,2,0,1,2,10100,111,111)
POCKET4(100,0,1,5,10,-
131.42,20.36,1,0,0,300,0.1,0,21,10,9,15,2,2,0,1,2,10100,111,111)
POCKET4(100,0,1,5,10,-
131.42,49.64,1,0,0,300,0.1,0,21,10,9,15,2,2,0,1,2,10100,111,111)
POCKET4(100,0,1,5,12,-
139,10,1,0,0,300,0.1,0,21,10,9,15,2,2,0,1,2,10100,111,111)
M30
POCKET4(100,0,1,5,30,-
115,35,1,0,0,300,0.1,0,21,40,9,15,2,2,0,1,2,10100,111,111)
POCKET4(100,0,1,5,13,-
11,10,1,0,0,300,0.1,0,21,10,9,15,2,2,0,1,2,10100,111,111)
POCKET4(100,0,1,5,15,-
35,40,1,0,0,300,0.1,0,21,10,9,15,2,2,0,1,2,10100,111,111)
POCKET4(100,0,1,5,14,-
66,18,1,0,0,300,0.1,0,21,10,9,15,2,2,0,1,2,10100,111,111)
M30
CYCLE62 ("MIPLAT1",1,,)
CYCLE72 ("",100,0,2,10,1,0,0,600,500,1,42,1,5,0.1,1,5,0,1,2,101,1011,101)
CYCLE62 ("MIPLAT2",1,,)
CYCLE72 ("",100,0,2,5,1,0,0,600,500,10001,42,1,5,0.1,1,5,0,1,2,101,1011,101)
M30
CYCLE61(100,0,1,10,-45,35,-60,37,1,80,0,500,41,0,1,11)
CYCLE61(100,0,1,10,-135,35,-16,37,1,80,0,500,41,0,1,11)
M30
CYCLE62 ("BOSSAGE5",1,,)
CYCLE72 ("",100,0,2,5,1,0.1,0,600,300,1,42,2,10,0.1,2,10,0,1,2,101,1011,101)
M30
CYCLE62 ("BOSSAGE10",1,,)

```

```

CYCLE72 ("",100,0,2,10,1,0.1,0,600,300,1,42,2,10,0.1,2,10,0,1,2,101,1011,101)
M30
CYCLE77(100,0,2,,10,17,-20,55,1,0.1,0,200,200,0,1,100,1,2,100,1,101)
M30

E LAB A MIPLAT1: ;#SM Z:3
;#7_DlgK contour definition begin - Don't change!;*GP*;*RO*;*HD*
G17 G90 DIAMOF;*GP*
G0 X-14.75 Y46 ;*GP*
G1 Y63 ;*GP*
;CON,0,0.0000,1,1,MST:0,0,AX:X,Y,I,J,TRANS:1;*GP*;*RO*;*HD*
;S,EX:-14.75,EY:46;*GP*;*RO*;*HD*
;LU,DEY:17;*GP*;*RO*;*HD*
;#End contour definition end - Don't change!;*GP*;*RO*;*HD*
E LAB E MIPLAT1:

E LAB A MIPLAT2: ;#SM Z:3
;#7_DlgK contour definition begin - Don't change!;*GP*;*RO*;*HD*
G17 G90 DIAMOF;*GP*
G0 X-25.22 Y46.5 ;*GP*
G1 Y64.5 ;*GP*
;CON,0,0.0000,0,0,MST:0,0,AX:X,Y,I,J,TRANS:1;*GP*;*RO*;*HD*
;S,EX:-25.22,EY:46.5;*GP*;*RO*;*HD*
;LU,DEY:18;*GP*;*RO*;*HD*
;#End contour definition end - Don't change!;*GP*;*RO*;*HD*
E LAB E MIPLAT2:
M30

E LAB A BOSSAGE5: ;#SM Z:2
;#7_DlgK contour definition begin - Don't change!;*GP*;*RO*;*HD*
G17 G90 DIAMOF;*GP*
G0 X-120 Y62.5 ;*GP*
G3 Y57.5 I=AC(-120) J=AC(60) ;*GP*
Y62.5 I=AC(-120) J=AC(60) ;*GP*
;CON,0,0.0000,1,1,MST:0,0,AX:X,Y,I,J,TRANS:1;*GP*;*RO*;*HD*
;S,EX:-120,EY:62.5;*GP*;*RO*;*HD*
;ACCW,DEX:0,DEY:-5,RAD:2.5;*GP*;*RO*;*HD*
;ACCW,DEX:0,DEY:5,RAD:2.5;*GP*;*RO*;*HD*
;#End contour definition end - Don't change!;*GP*;*RO*;*HD*
E LAB E BOSSAGE5:

E LAB A BOSSAGE10: ;#SM Z:3
;#7_DlgK contour definition begin - Don't change!;*GP*;*RO*;*HD*
G17 G90 DIAMOF;*GP*
G0 X-120 Y65 ;*GP*
G3 Y55 I=AC(-120) J=AC(60) ;*GP*
Y65 I=AC(-120) J=AC(60) ;*GP*
;CON,0,0.0000,3,3,MST:0,0,AX:X,Y,I,J,TRANS:1;*GP*;*RO*;*HD*
;S,EX:-120,EY:65;*GP*;*RO*;*HD*
;ACCW,DEX:0,DEY:-10,RAD:5;*GP*;*RO*;*HD*
;ACCW,DEX:0,DEY:10,RAD:5;*GP*;*RO*;*HD*
;#End contour definition end - Don't change!;*GP*;*RO*;*HD*
E LAB E BOSSAGE10:

```

3.1 Explication détaillée du G-code utilisé pour l'usinage CNC d'une pièce en aluminium :

Ce programme G-code a été conçu pour la fabrication d'une pièce en aluminium à l'aide d'une machine-outil à commande numérique (CNC). Il regroupe l'ensemble des instructions nécessaires au guidage de l'outil à travers les différentes phases du processus d'usinage : préparation du brut, sélection de l'outil, opérations de perçage, fraisage, création de cavités (poches), finitions, etc.

3.1.1. Définition du brut (commande WORKPIECE) :

L'instruction WORKPIECE définit les dimensions et les limites de la matière brute. Le mot-clé "BOX" indique que la forme initiale du brut est un parallélépipède rectangle. Les coordonnées fournies permettent à la machine de connaître la zone dans laquelle les opérations d'usinage seront réalisées.

3.1.2. Configuration du système de travail :

Les commandes :

- G17 sélectionne le plan XY comme plan de travail principal,
- G90 active le mode de programmation en coordonnées absolues,
- G58 appelle un décalage de référence prédéfini, ajustant ainsi le système de coordonnées de la machine à la position réelle de la pièce.

3.1.3 Sélection de l'outil et configuration de la broche :

L'outil numéro 81 est appelé et installé (M6). Ensuite, la broche est configurée pour tourner à une vitesse de 1000 tours par minute (S1000), avec une avance linéaire de 200 mm/min (F200). La commande M3 lance la rotation de la broche dans le sens horaire.

3.1.4. Exécution des cycles automatisés :

Plusieurs cycles préprogrammés sont utilisés, tels que :

- CYCLE62 pour le fraisage de surfaces obliques,
- CYCLE72 pour la création de poches,
- CYCLE77 pour d'autres formes complexes.

Ces cycles simplifient la programmation et garantissent une répétabilité précise des opérations.

3.1.5. Déplacement et usinage linéaire :

Les commandes G0 et G1 permettent de déplacer l'outil respectivement en rapide (sans coupe) ou en coupe linéaire, vers des coordonnées précises, selon les trajectoires définies dans le programme.

3.1.6. Usinage de poches (commande POCKET4) :

La commande POCKET4 permet de creuser des cavités de formes variées (généralement rectangulaires ou circulaires). Chaque poche est usinée selon des dimensions et des profondeurs bien définies, et à des emplacements précis sur la pièce.

3.1.7. Génération de bossages (formes en relief) :

L'instruction CYCLE62 ("BOSSAGE5") est utilisée pour créer des bossages, c'est-à-dire des zones en relief sur la pièce. Ces éléments peuvent avoir une fonction d'assemblage ou répondre à des contraintes de conception spécifiques.

3.1.8. Usinage circulaire (commande G3) :

La commande G3 permet d'effectuer des mouvements circulaires dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Les paramètres I et J déterminent le centre du cercle relatif à la position actuelle de l'outil, permettant ainsi de produire des arcs de cercles précis.

3.1.9. Structure logique du programme :

Des labels tels que E_LAB_A... et E_LAB_E... sont utilisés pour structurer le programme en différentes sections. Cela facilite la lecture, la maintenance et la réutilisation des blocs de code.

3.1.10. Fin du programme :

L'instruction M30 marque la fin du programme. Elle arrête l'usinage, réinitialise le système de commande numérique, et prépare la machine pour une nouvelle opération.

3.2 Processus de fabrication sur CNC

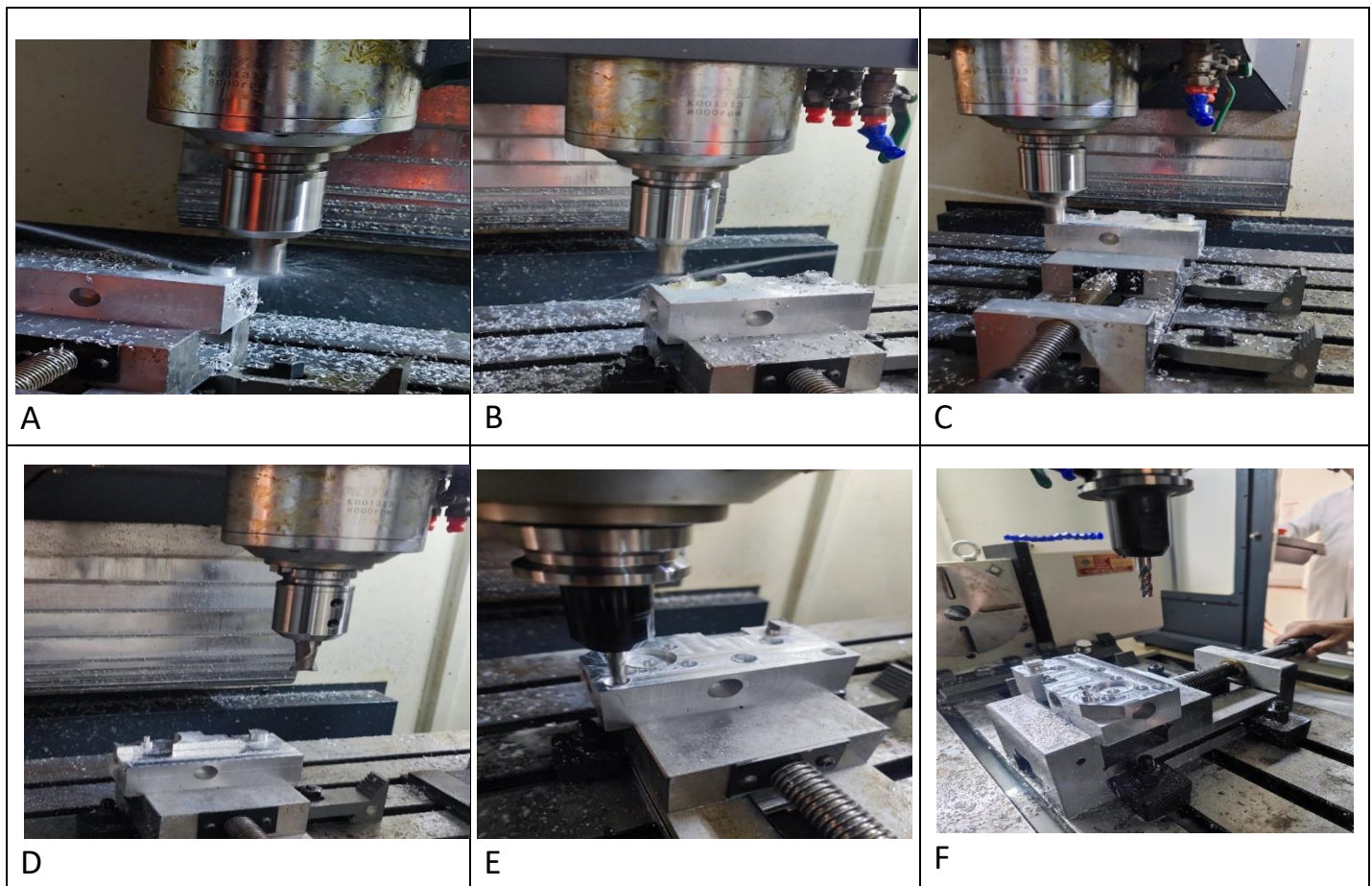


Figure III.16 : Processus de fabrication sur CNC.

4- contrôle de la pièce par la machine à mesuré tridimensionnelle :

Après avoir terminé la fabrication de la pièce et parcouru toutes les étapes de fabrication, l'étape de fixation des dimensions de la pièce fabriquée est venue à l'aide d'un appareil de mesure tridimensionnel disponible dans le laboratoire universitaire.

Avant de commencer le processus de mesure, nous définissons la machine sur laquelle nous travaillons :

Type de machine : Il s'agit d'une machine à mesurer tridimensionnelle à portique mobile ou à pont. Ce type de MMT est couramment utilisé pour l'inspection dimensionnelle de pièces fabriquées

Fabricant : Mitutoyo, un fabricant japonais renommé d'instruments de mesure et d'équipements métrologiques.

Modèle : MXF 203, comme indiqué sur le bras vertical de la machine.

Composants visibles et leurs fonctions probables :

-Table en granit : La pièce à mesurer est placée sur une table en granit (la grande dalle noire et mouchetée). Le granit est utilisé pour sa grande stabilité dimensionnelle (faible coefficient de dilatation thermique) et sa planéité.

-Structure à portique/pont : La structure de couleur beige qui se déplace au-dessus de la table. Cette structure guide la sonde de mesure dans les trois dimensions (axes X, Y et Z).

-Sonde de mesure (palpeur) : L'élément situé à l'extrémité du bras vertical qui entre en contact avec la pièce à inspecter. Elle détecte les points sur la surface de l'objet pour en déterminer les dimensions et la géométrie. Le palpeur visible sur l'image semble être un palpeur à contact.

-Système de commande et d'affichage : Sur la gauche, on aperçoit un boîtier avec des commandes et potentiellement un affichage numérique, qui sert probablement à contrôler les mouvements de la machine et à afficher les résultats de mesure.

-Guides et échelles de mesure : Bien que non visibles en détail, la machine est équipée de règles de mesure de haute précision (probablement des règles optiques ou inductives) sur chaque axe pour déterminer la position exacte du palpeur.

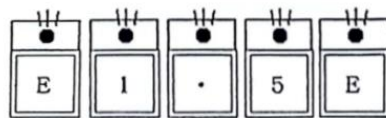


Figure III.17 : Machine mesure tridimensionnelle MMT (labo, métrologie de la faculté de technologie université de M'sila).

5. Calcule des dimensions :

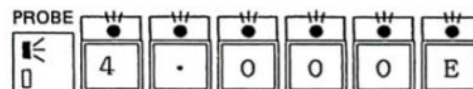
- 1- Allumez l'appareil
- 2- Préparation de la tête de mesure (probe)
- 3- fixe la pièce dans la table
- 4- Définir le système de coordonnées :
- 4.1-Systèmes de coordonnées :

4.1.1 - Réglez le programme de mesure en appuyant sur les touches suivantes :



X	0.000
Y	0.000
Z	0.000
S	1500

4.1.2 - Préparez la tête de mesure en appuyant sur :



X	
Y	
Z	
S	4000

4.2- Définir le système de coordonnées de la pièce :

L'une des étapes les plus importantes de toutes est que nous informons la machine exactement où se trouve la pièce et les directions des axes associés à la pièce elle-même et non à la machine
Le plus courant est d'utiliser un niveau de surface supérieur afin que :

4.2.1 Identification du niveau :

Nous appuyons sur une touche P-ALN Nous pressons une touche après cela, l'appareil nous demande de choisir 3 points dispersés sur la surface de la pièce et un point imaginaire (dummy point) froissé au-dessus de la surface (ce point aide la machine à comprendre le sens de la surface)

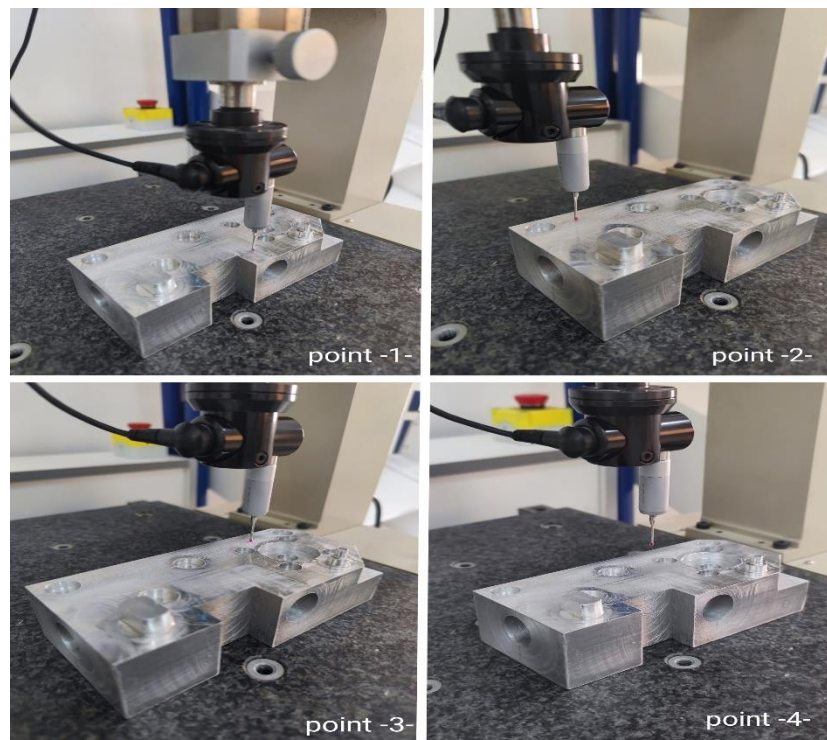
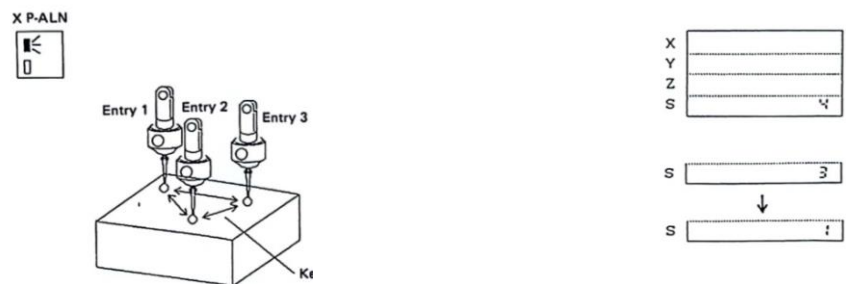
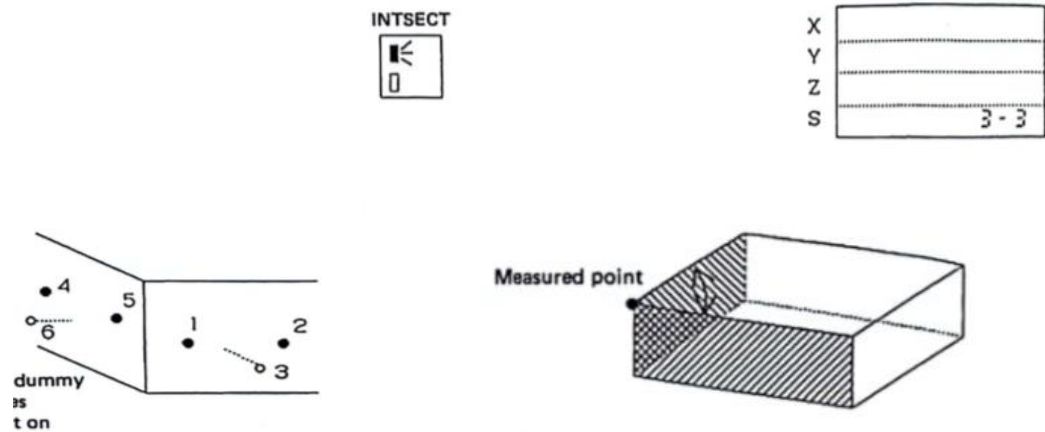


Figure III.18 : Déterminer la planéité de la surface à l'aide d'une machine (MMT).

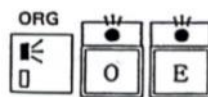
4.2.2 Déterminer le point d'origine :

Après avoir déterminé la surface du plan, nous déterminons maintenant le point de référence pour la pièce, qui est le dernier point enregistré par l'appareil. Il peut être le centre d'un cercle, une ligne, un point ou l'angle où les deux arêtes se rencontrent

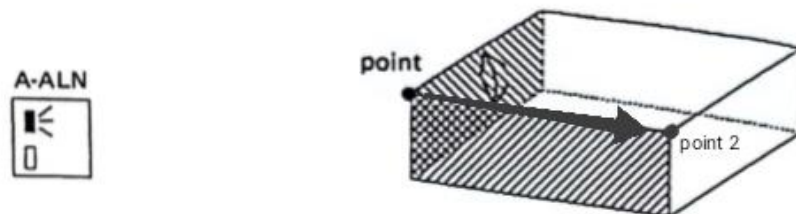
Dans notre cas, nous avons choisi le point de référence par l'intersection de deux arêtes de sorte que nous pressons la touche d'intersection et puis déplacer la tête de probe à la première surface et choisir deux points et un point pour la machine qui est mieux espacée pour une meilleure précision de calcul. Après cela, nous déplaçons la probe à la deuxième surface et choisissons deux points ainsi qu'un point pour la machine



Après cela, cliquez sur l'original du clavier :



Par ceci, nous sélectionnons le point X et choisissons l'axe dans la deuxième direction de l'intersection des deux lignes et appuyons :



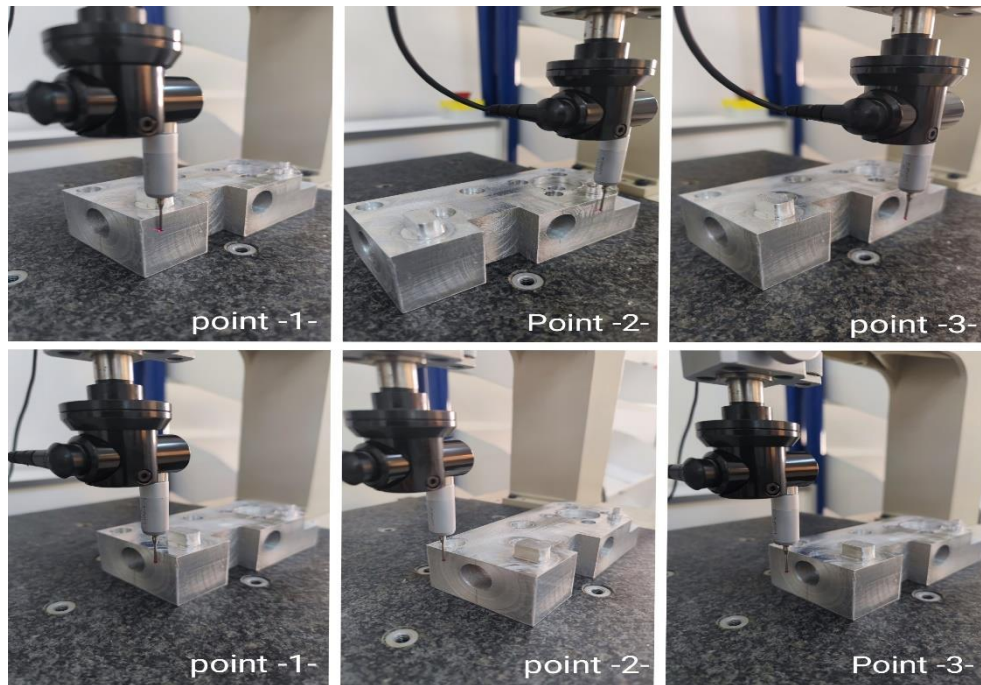


Figure III.19 : Déterminer l'origine de la pièce à l'aide d'une machine.

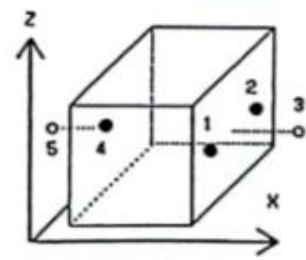
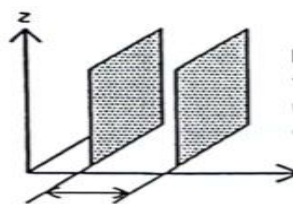
5. Le programme de mesure est apparu :

5.1 longueur et la largeur :

Pour calculer la longueur et la largeur de la pièce, on appuie sur une touche du clavier



Donc, nous déplaçons le probe sur le premier côté et choisissons deux points et un point pour la machine, puis nous déplaçons vers le deuxième côté et choisissons un point et un autre point pour la machine



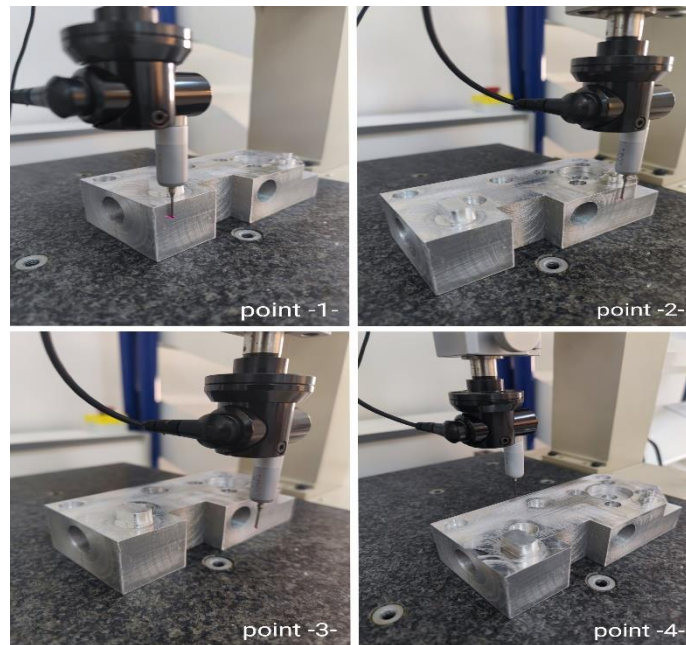
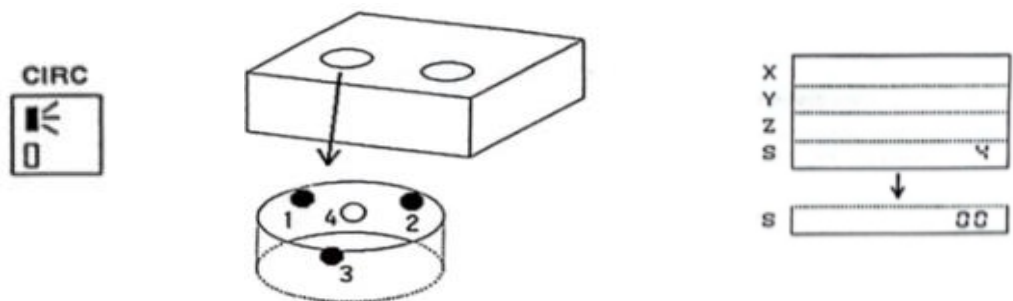


Figure III.20 : Déterminer la longueur et largeur de la pièce à l'aide d'une machine.

5.2 Les cercle :

Pour mesurer le diamètre du cercle à travers le clavier, on appuie sur le bouton cercle qui apparaît sur l'écran numéro 4, c'est-à-dire qu'on déplace le probe vers le cercle à mesurer, on fixe Z, et on choisit 3 points séparés sur le cercle et un point pour la machine



Et ainsi avec le reste des cercles de la pièce

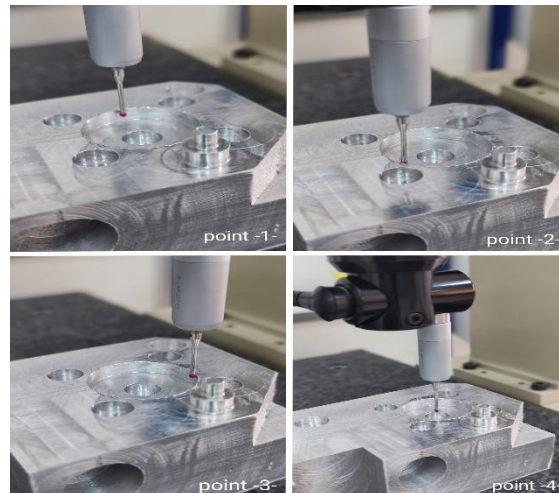


Figure III.21 : Déterminer la circularité de la pièce à l'aide d'une machine.

Les cercles que nous avons mesurés étaient sur le plan XY

Pour évaluer des circuits à d'autres niveaux en utilisant le panneau de commande, nous sélectionnons le niveau auquel nous voulons mesurer le circuit Sur

Sur ZX plan :

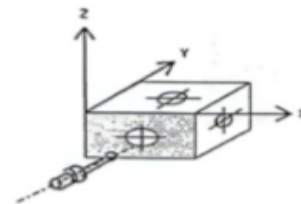


Figure III.22 : Déterminer la circularité de la pièce sur (ZX) à l'aide d'une machine.

Sur YZ plan :

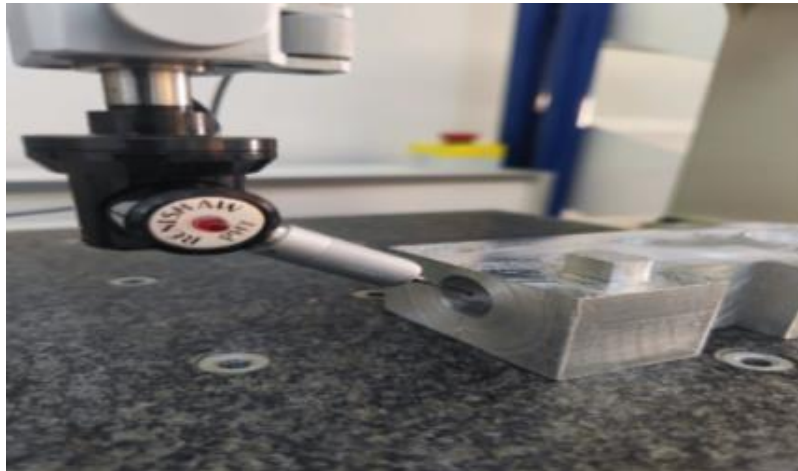
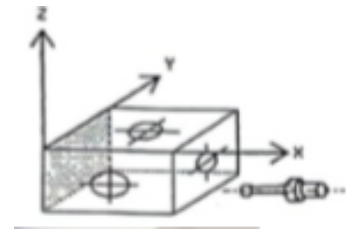
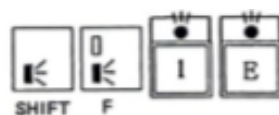


Figure III.23 : Déterminer la circularité de la pièce sur (YZ) à l'aide d'une machine.

5.3 la cylindricité :

Pour mesurer le cylindre, la pièce est en utilisant le clavier et on appuie sur plusieurs verrous

Après activation de la fonction cylindre,



On remarque l'apparition du numéro 7 indiquant le nombre de points possibles pour mesurer le cylindre, puisque mesurer un cylindre nécessite généralement un minimum de 6 points (3 sur chaque niveau et un pour la machine)



Nous dirigeons la tête du capteur vers le premier cylindre et faisons :

Nous Fixons Z, et prenons 3 points séparés autour du premier niveau

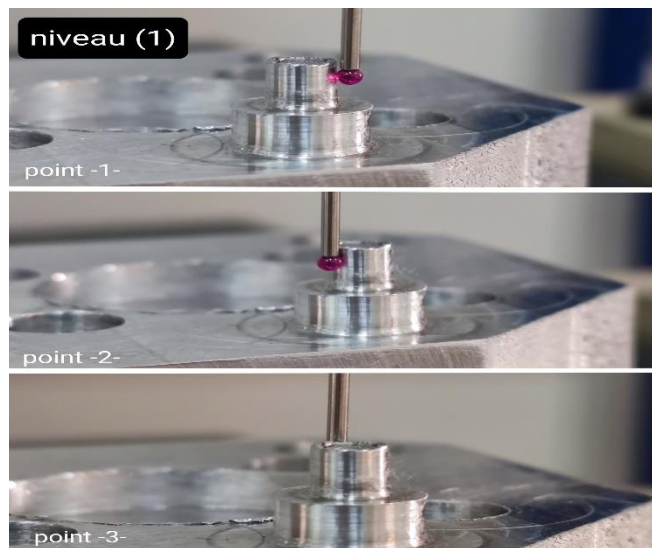
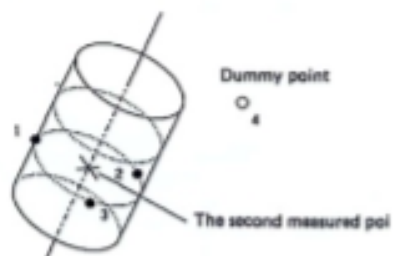


Figure III.24 : Déterminer la cylindricité de la pièce à l'aide d'une machine.

Après cela, nous changeons l'emplacement de Z et prenons 3 autres points séparés. Le deuxième niveau et le septième point sont pour la machine.



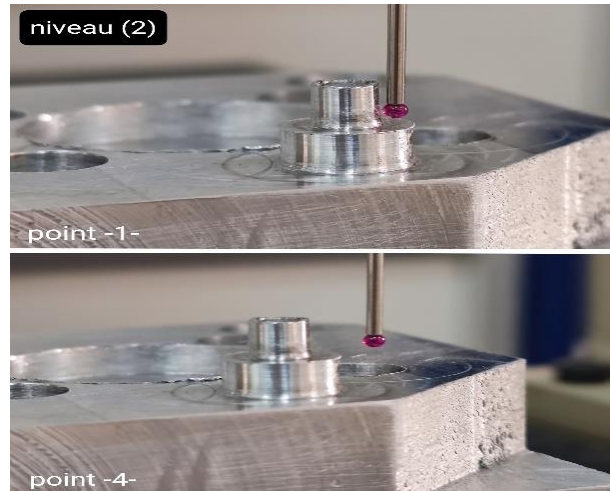


Figure III.25 : Déterminer la cylindricité de la pièce à l'aide d'une machine.

Nous attendons un peu après cela, les résultats de mesure apparaissent.

Pour le deuxième cylindre, on procède de la même manière : on place Z au premier niveau en prenant 3 points séparés, puis on le change au second niveau en prenant 3 points séparés, et enfin on ajoute un point pour la machine (dummy point), bien sûr, dans ce dernier cas.

Le premier niveau :

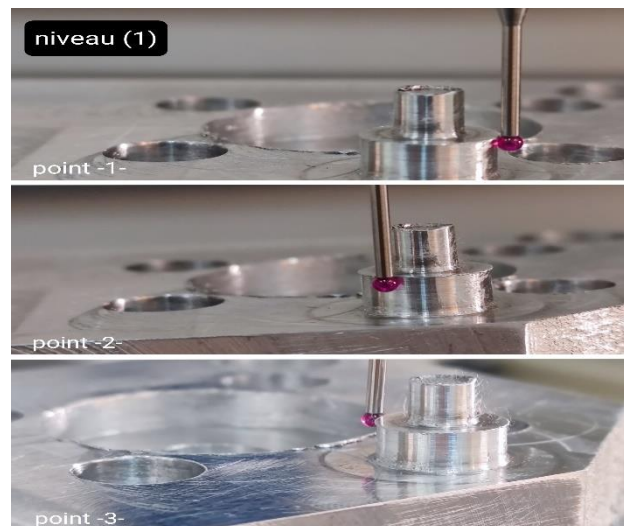


Figure III.26 : Déterminer la cylindricité de la pièce à l'aide d'une machine.

Le deuxième niveau :

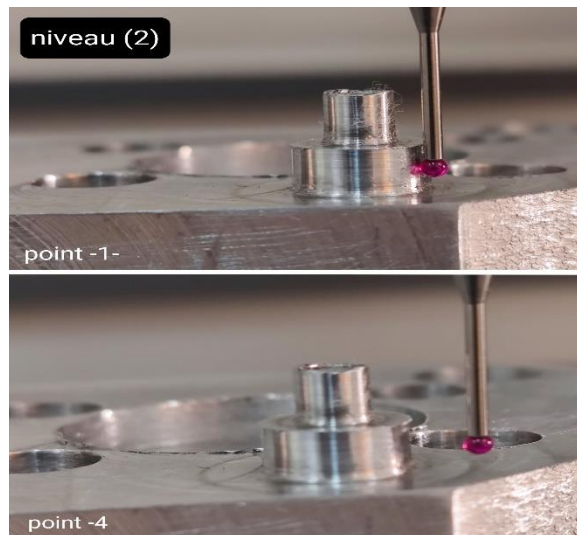


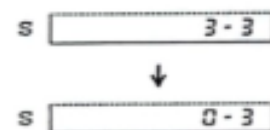
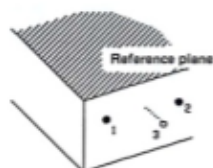
Figure III.27 : Déterminer la cylindricité de la pièce à l'aide d'une machine.

5-4 angles :

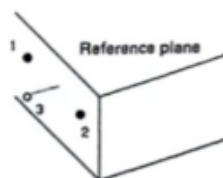
Pour calculer un angle sur la pièce à travers le clavier, on appuie sur le bouton INTSECT



Après cela, nous déplaçons la tête de probe pour intersecté les deux surfaces. Nous prenons ensuite 3 points pour la première surface (deux points à part pour améliorer la précision de mesure et un point pour la machine)



Après cela, nous déplaçons la probe à la deuxième surface et prenons 3 points (également deux points à part pour améliorer la précision de la mesure et un point pour la machine)



Enfin, nous obtenons l'angle d'intersection de ces deux niveaux

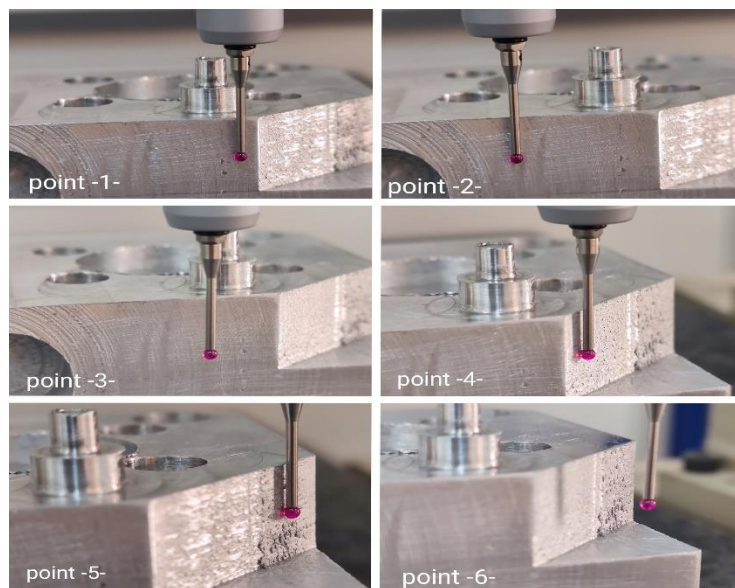


Figure III.28 : Déterminer l'angle de la pièce à l'aide d'une machine.

5-5 distances entre 2 points :

Pour définir la distance entre 2 points, on appuie sur le bouton PITCH

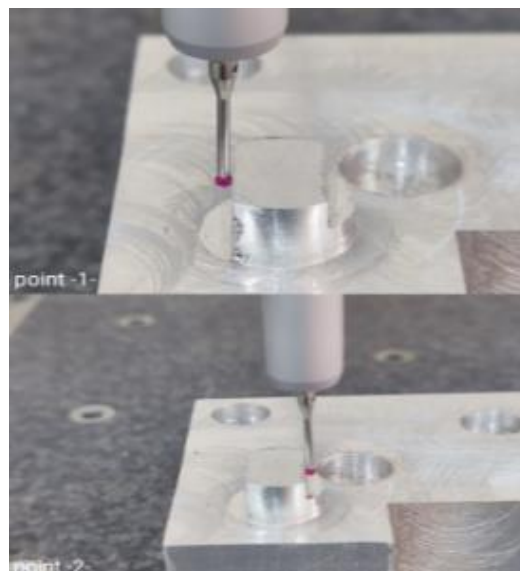


Figure III.39 : Déterminer la distance entre 2 points de la pièce à l'aide d'une machine.

Conclusion :

Ce chapitre décrit les différentes étapes suivies pour effectuer le contrôle géométrique d'une pièce imprimée en imprimante 3D. Dans la première étape, le modèle numérique de la pièce a été conçu à l'aide du logiciel CATIA V5.

Ensuite, la pièce a été imprimée à l'aide d'une imprimante 3D.

Cependant, après l'impression, la forme de la pièce ne permettait pas une mesure précise à l'aide d'une machine mesure tridimensionnelle MMT. Cela a nécessité une troisième étape, dans laquelle une pièce équivalente a été fabriquée en aluminium en deux étapes aussi fabriquée usinage et à l'aide d'une machine CNC, afin d'assurer une meilleure précision géométrique.

Enfin, dans la quatrième étape, les deux pièces ont été mesurées à l'aide de la MMT, malgré une légère différence dimensionnelle, dans le but de vérifier et de comparer leurs dimensions.

Chapitre IV

-Résultat et discussion-

Introduction :

Après avoir franchi toutes les étapes de conception, d'impression et de fabrication, jusqu'au contrôle à l'aide d'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), ce chapitre présente et analyse les résultats de mesure obtenus. Il vise à évaluer la précision dimensionnelle par rapport aux valeurs théoriques et à identifier les facteurs susceptibles d'influencer ces résultats, qu'ils soient liés au procédé de fabrication, aux matériaux utilisés ou aux conditions de mesure. Les facteurs techniques et d'ingénierie affectant les résultats sont examinés en comparant les deux pièces : l'aluminium imprimé et l'aluminium usiné. Cette analyse permettra de mieux comprendre les différences observées et de tirer des conclusions utiles pour améliorer le processus de fabrication et de contrôle.

Avant de commencer le contrôle, nous examinerons la fiabilité d'une machine à mesurer tridimensionnelle. Ce chapitre est divisé en deux parties :

La première examine la fiabilité de la machine à mesurer tridimensionnelle, Et la deuxième les résultats de mesure des deux pièces.

Partie 1 :

1. introduction :

Avant d'effectuer des mesures importantes sur les pièces produites en plus (imprimées en 3D) et les pièces équipées de machines à commande numérique par ordinateur (CNC), il était nécessaire de vérifier la fiabilité de la machine de mesure de coordonnées (MMT) utilisée. La fiabilité d'une machine à mesurer par coordonnées influe directement sur la qualité des données collectées et, par conséquent, sur la pertinence des analyses qui en résultent.

L'objectif de cette étude préliminaire était de vérifier la reproductibilité des mesures effectuées par la machine et leur stabilité dans le temps, sur plusieurs campagnes de mesure réalisées à différents jours.

2. objectif de l'étude :

L'objectif principal est d'évaluer la stabilité dimensionnelle d'une machine à mesurer par coordonnées (MMC) en effectuant quatre séries de mesures sur la même pièce de référence en aluminium, sans modifier les conditions de mesure.

Ce test nous permet de noter :

- Répétabilité de la mesure
- Changements possibles au fil du temps
- Il a détecté des écarts ou des instabilités possibles dans le système de mesure.

3. Description de la méthode et des entités mesurées :

Le même morceau d'aluminium a été utilisé dans toutes les campagnes. Il contient diverses caractéristiques métriques :

- **Dimensions linéaires** : longueur, largeur.
- **Cercles dans le plan XY** : 10 repères avec différents diamètres et positions.
- **Cylindres** : mesures du diamètre (D) et de la largeur (W).
- **Angles**.
- **Bords biseautés**.
- **Distance entre deux points**.

Chaque repère a été mesuré quatre fois, en maintenant la même composition et les mêmes conditions environnementales.

4. présentation et organisation des résultats :

Les résultats sont présentés dans un tableau -1- numérique accompagné d'un graphique vertical (Figure IV.1.) Ce tableau donne un aperçu de l'écart de mesure pour chaque élément.

Les données numériques montrent clairement que les écarts entre les différentes mesures sont minimales et dans des limites acceptables pour une analyse dimensionnelle précise.

Column1	Pièces alu(mm)	Mesure -1-	Mesure-2-	Mesure -3-	Mesure-4-
P-ALN	0	0,11	0,17	0,17	0,12
INTSECT	90	90,01/90,00	90,02	90,02	90,01
LONGUEUR	150	149,92	149,88	150,1	150,04
LARGEUR	70	70	70	70	70
cercle _(xy) -1-	13	13,12	13,15	13,17	13,14
cercle _(xy) -2-	14	14,06	14,06	14,05	14,05
cercle _(xy) -3-	15	15,05	15,04	15,04	15,05
Cercle _(xy) -4-	30	30,03	30,02	30,04	30,02
Cercle _(xy) -5-	10	10,05	10,07	10,12	10,1
Cercle _(xy) -8-	12	12,05	12,08	12,08	12,07
Cercle _(yz) -9-	20	20,12	20,14	20,11	20,12
Cercle _(zx) -10-	20	20,09	20,08	20,09	20,09
Cylindre	5	D=5,22/W=90	D=5,22/W=89,47	D=5,23/W=90,01	D=5,23/W=90
Cylindre	10	D=10,22/W=89,49	D=10,31/W=90	D=10,21/W=90	D=10,23/W=89,70
Angle	140,32	140,02	139,57	140,7	140,21
Angle	129,68	129,53	129,49	129,46	129,44
Chanfrein	30	30,5	29,79	29,8	29,82
Chanfrein-int-	90	90,26	90,31	90,17	90,16
Distance-cyl	10,5	10,53	10,49	10,49	10,5

Tableau IV.1 : Quatre déférences mesure par MMT.

4.1 Exemple de l'observation :

Longueur : Les quatre mesures sont comprises entre 149,82 mm et 150,02 mm, avec un écart maximal de 0,20 mm.

- **Largeur** : Toutes les mesures sont 70mm, sans aucune différence.
- **Du cercle (XY) 1 au cercle (XY) 10** : différences maximales très faibles, à moins de 0,05 mm.

- **Cylindres** : Les diamètres mesurés (D) et les largeurs mesurées (W) sont cohérents d'une mesure à l'autre, sans écart significatif.
- **Coins et bords biseautés** : légères variations, généralement inférieures à 0,2 degré.

4.2 Interprétation graphique :

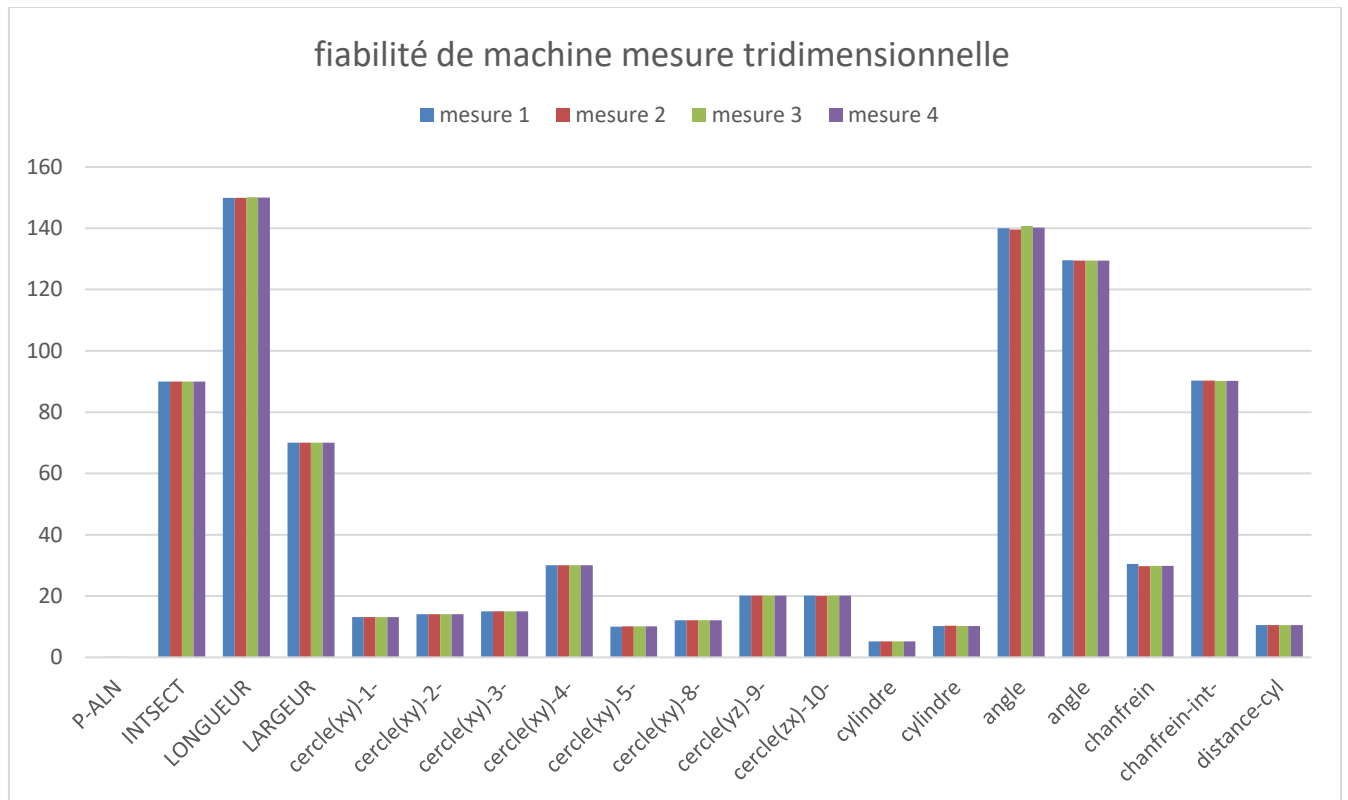


Figure IV.1 : Fiabilité de machine mesure tridimensionnelle.

Le graphique à barres offre une visualisation rapide de la stabilité des mesures. Nous observons un chevauchement quasi parfait entre les barres représentant les quatre mesures pour chaque entité, confirmant la fiabilité du système de mesure.

Il convient de noter :

- Les barres correspondant à la largeur, à la longueur et aux cercles 1 à 10 présentent très peu de variation.
- La distance entre les rouleaux ainsi que les bords biseautés présentent une consistance remarquable, avec des variations inférieures à 0,02 mm.

5. discussion et interprétation des résultats :

Les légères différences observées entre les quatre mesures consécutives soulignent la qualité de répétabilité et de stabilité temporelle. Aucun comportement anormal, aucune déviation ou tendance systématique n'a été observé.

Cela indique que :

- Dispositif bien étalonné,
- Conditions environnementales stables
- Les mesures sont effectuées régulièrement.

6. sources potentielles des écarts :

Quelques différences mineures peuvent s'expliquer par :

- Un léger défaut mécanique dans la machine de mesure des coordonnées
- Différences de température ambiante qui ne sont pas automatiquement compensées
- Le repositionner manuellement la pièce sur la table
- L'instabilité de la personne mesurée
- Les erreurs de détection par sonde tactile.

Toutefois, ces écarts demeurent dans les limites fonctionnelles généralement admises.

7. Analyse graphique des données :

7.1 Analyse graphique de la tendance :

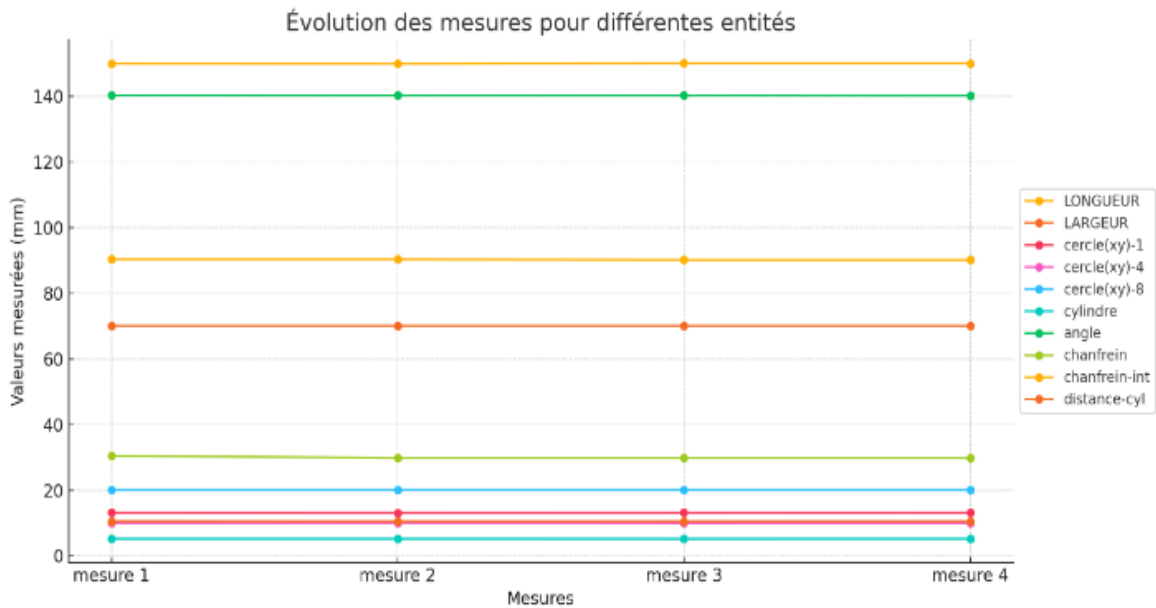


Figure IV.2 : Évolution des mesures pour différentes entités (lignes par entité).

Le graphique suivant montre l'évolution des mesures sur les quatre sessions pour toutes les entités. Nous observons une stabilité générale avec de légères variations pour certaines entités sensibles (comme la longueur ou l'angle).

7.2 Analyse de la dispersion - graphique encadré :

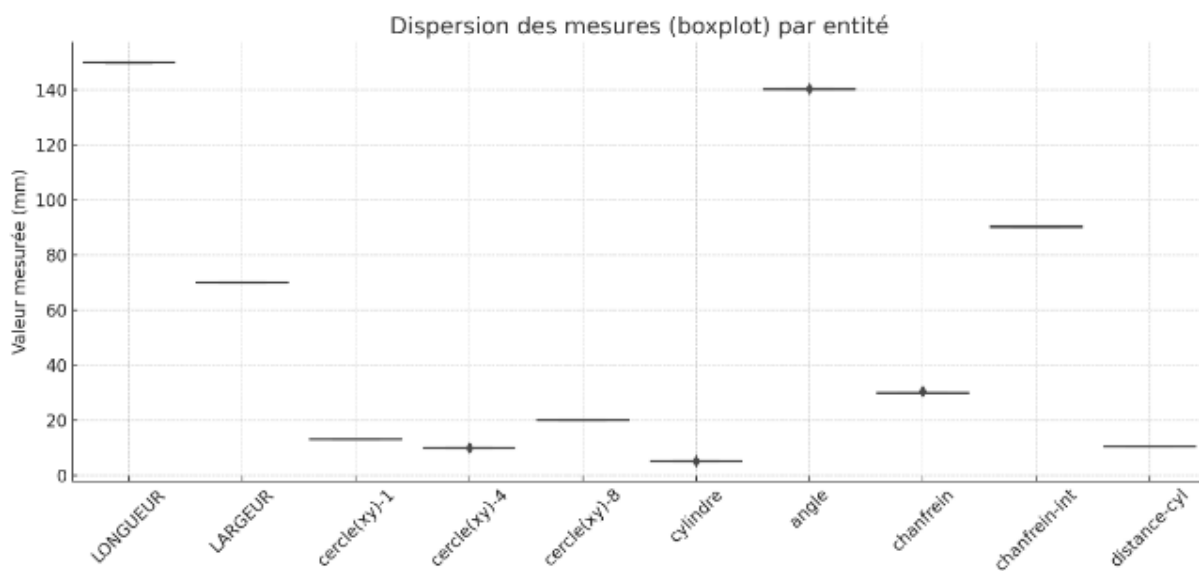


Figure IV.3 : Dispersion des mesures (boxplot) par attribut.

Il s'agit du graphique en boîte qui représente la dispersion des mesures pour chaque attribut. Ce graphique permet de visualiser la stabilité des mesures et de détecter les éventuelles anomalies ou écarts :

- Les attributs tels que la largeur (LARGEUR), la longueur (LONGUEUR), le cercle (xy) -8 et le rapport des arêtes biseautées (chanfrein-INT) montrent une dispersion proche de zéro, ce qui reflète une excellente reproductibilité.
- Les variations mineures de rouleaux, d'angles ou de bords biseautés restent dans des marges très étroites, ce qui est acceptable selon les normes de l'industrie.

7.3 Analyse de la précision :

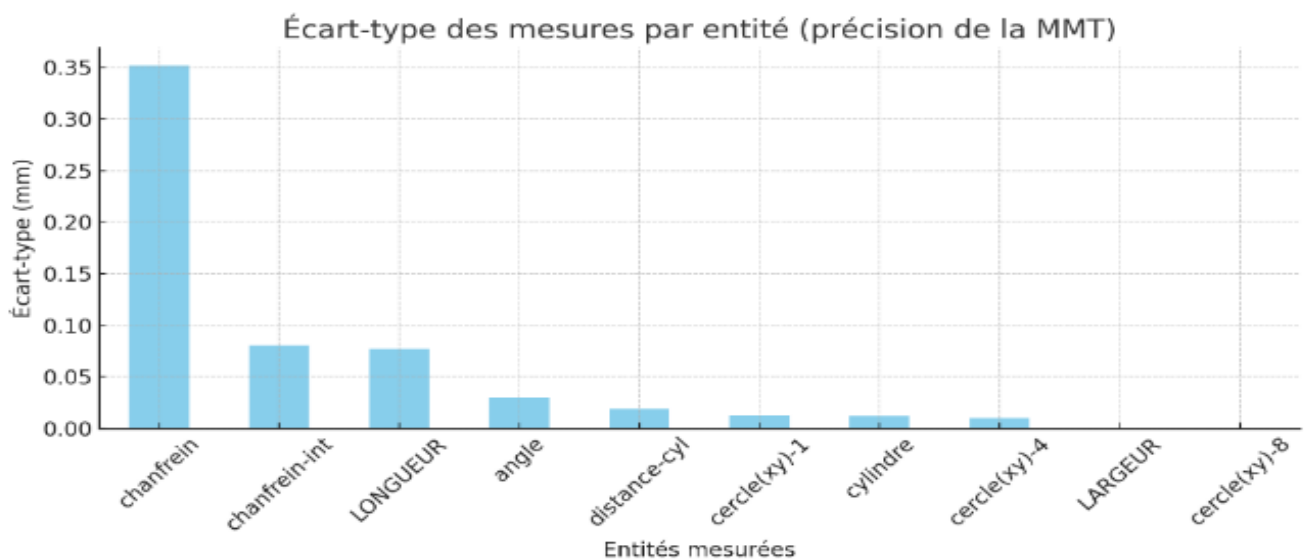


Figure IV.4 : Écart type des mesures pour chaque entité.

Ce graphique montre les écarts-types pour chaque paramètre mesuré. Il aide à identifier des repères présentant un contraste plus élevé :

- Les paramètres tels que la longueur et l'angle présentent un écart-type légèrement supérieur, ce qui peut être attribué à une sensibilité géométrique ou à des conditions de mesure particulières.
- La majorité des caractéristiques présentent une haute résolution avec de très faibles écarts types ($<0,02$ mm), ce qui montre une bonne reproductibilité pour une machine à mesurer par coordonnées.

Conclusion :

L'analyse de la fiabilité de la machine à mesurer par coordonnées (MMC), réalisée sur quatre campagnes de mesure distinctes, a validé les performances du dispositif avant le début des mesures clés sur certaines parties de l'étude. Les résultats obtenus ont montré une excellente reproductibilité et peu de variabilité entre les différentes sessions, montrant la stabilité du système de mesure dans le temps.

Les représentations graphiques (évolution des mesures, diagrammes, écarts-types) confirment que la majorité des caractéristiques mesurées présentent une dispersion très faible et souvent négligeable. Les quelques variations observées restent dans des plages acceptables, ce qui prouve que la machine à mesurer par coordonnées est capable d'assurer des mesures fiables et précises.

En conclusion, cette validation initiale est une étape essentielle car elle renforce la confiance dans les résultats futurs. Il garantit que les différences observées entre les pièces imprimées en 3D et usinées CNC ne seront pas causées par des incertitudes de mesure, mais par les processus eux-mêmes. Ainsi, ce contrôle renforce la crédibilité et l'exactitude scientifique de toute l'étude.

Partie 2

1. Résultats de la mesure pour la pièce imprimée en 3D :

La première mesure a été effectuée sur la pièce fabriquée par impression 3D, à l'aide de la machine à mesure tridimensionnelle (MMT).

Cette pièce présente une complexité relative dans cette forme générale, ainsi qu'une surface irrégulière en raison de la nature de l'impression par dépôt de couches, ce qui a posé certains défis lors de la mesure, notamment en ce qui concerne la stabilité de la pièce et la précision du contact entre la sonde et cette surface.

Un ensemble de dimensions géométriques de base, définies dans programme CATIA, a été sélectionné et mesure à l'aide de l'appareil pour obtenir la valeur réelle. Le tableau suivant présente une comparaison entre les valeurs théoriques et les valeurs mesurées :

Column1	Pièces 3D(mm)	MMT (mm)	Écart(mm)	Tolérance(mm)	Conforme
P-ALN	0	0,03	0,03	±0,01	Non
INTSECT	90	90,02/90,04	0,02	±0,3	Oui
LONGUEUR	100	99,87	-0,13	±0,3	Oui
LARGEUR	50	49,95	-0,05	±0,3	Oui
Cercle _(xy) -1-	8	7,5	-0,5	±0,2	Non
Cercle _(xy) -2-	9	8,4	-0,6	±0,2	Non
Cercle _(xy) -3-	8	9,3	1,3	±0,2	Non
Cercle _(xy) -4-	20	19,5	-0,5	±0,2	Non
Cercle _(xy) -5-	5	4,34	-0,66	±0,1	Non
Cercle _(xy) -8-	8	7,53	-0,47	±0,2	Non
Cercle _(yz) -9-	15	15,02	0,02	±0,2	Oui
Cercle _(zx) -10-	15	14,98	-0,02	±0,2	Oui
Cylindre	6	D=3,82/w=2,27	-2,18	±0,1	Non
Cylindre	2,5	D=2,48/w=2,26	-0,02	±0,1	Oui
Angle	145,24	145,11	-0,13	±0,2	Non
Angle	124,75	124,45	-0,3	±0,3	Non
Chanfrein	20	19,75	-0,25	±0,4	Non
Chanfrein-int	90	90,25	0,25	±0,5	Non
Distance-cyl	4,87	5	0,13	±0,6	Non

Tableau IV.2 : Résultats de la pièce faite par machine d'impression 3D.

Cette pièce imprimée en 3D a montré de mauvais résultats de mesure, avec des écarts beaucoup plus importants entre les dimensions théoriques et mesurées. Cette faible variation est principalement due à la technologie d'impression elle-même, qui permet de produire des pièces avec une faible précision, ainsi qu'une rigidité moindre, avec une stabilité diminuée lors de la mesure.

Les dimensions de la pièce imprimée en 3D ne sont pas du tout stables.

2. Résultats de la mesure pour la pièce fabriquée en aluminium (CNC) :

La deuxième mesure a été effectuée sur la pièce fabriquée manuellement et à l'aide d'une machine CNC en aluminium. Cette pièce présente une surface plus uniforme et une plus grande précision par rapport à la pièce imprimée, ce qui a facilité le processus défini dans le programme CAD sont mieux représentées dans cette pièce en raison de la grande précision des machines CNC.

Voici le tableau comparatif entre les valeurs théoriques et les valeurs mesurées pour la pièce en aluminium :

Column1	Pièces alu(mm)	MMT (mm)	Écart(mm)	Tolérance(mm)	Conforme
P-ALN	0	0,11	0,11	±0,1	Non
INTSECT	90	90,01/90,00	0,01	±0,1	Oui
LONGUEUR	150	149,92	0,08	±0,1	Oui
LARGEUR	70	70	0	±0,1	Oui
Cercle _(xy) -1-	13	13,12	0,12	±0,05	Non
Cercle _(xy) -2-	14	14,06	0,06	±0,05	Non
Cercle _(xy) -3-	15	15,05	0,05	±0,05	Oui
Cercle _(xy) -4-	30	30,03	0,03	±0,01	Oui
Cercle _(xy) -5-	10	10,05	0,05	±0,05	Oui
Cercle _(xy) -8-	10	10,05	0,05	±0,05	Oui
Cercle _(yz) -9-	20	20,12	0,12	±0,1	Non
Cercle _(zx) -10-	20	20,09	0,09	±0,1	Oui
Cylindre	5	D=5,22/W=90	5,22/90	±0,05/1	Non/oui
Cylindre	10	D=10,22/W=89,49	10,22/0,51	±0,05/1	Non/oui
Angle	140,32	140,02	0,3	±1	Oui
Angle	129,68	129,53	0,15	±1	Oui
Chanfrein	30	30,5	0,5	±0,1	Non
Chanfrein-int-	90	90,26	0,26	±0,1	Non
Distance-cyl	10,5	10,53	0,03	±0,1	Oui

Tableau IV.3 : Résultats de la pièce faite par machine CNC.

Cette pièce en aluminium a montré des résultats de mesure plus précis, avec des différences beaucoup plus faibles entre les dimensions théoriques et mesurées. Cette différence réduite est

principalement due à la technologie CNC, qui permet de réaliser des pièces avec une grande précision, ainsi qu'à la rigidité d'aluminium, ce qui apporte une stabilité accrue lors de la mesure. Les dimensions de la pièce en aluminium étaient plus cohérentes, grâce au contrôle accru sur le design et la fabrication, en particulier avec la machine CNC qui garantissent une grande précision dans l'usinage.

De plus, le processus de fixation sur la table de mesure était plus stable pour la pièce en aluminium, ce qui permit une meilleure précision lors de la mesure, sans mouvement indésirable.

3 Analyse des différences entre les deux pièces :

En comparant les résultats de mesure des deux pièces, l'une fabriquée par impression 3D (PLA) et l'autre par machine CNC en aluminium, plusieurs des dimensions obtenues.

3.1 La pièce imprimée en 3D :

La pièce imprimée en 3D présente des écarts évidents par rapport aux valeurs théoriques, notamment dans les dimensions plus complexes telles que les arêtes ou les ondulations de surface et les cercles. Cela peut être attribué à l'accumulation progressive de matière pendant l'impression, ce qui a des effets mineurs sur les dimensions finales.

-Dans certaines zones, des écarts dus aux changements de température ont été observés pendant le processus d'impression, ce qui a affecté la précision dimensionnelle de la première ou de la dernière couche.

-En outre, la rugosité de surface de la pièce imprimée a joué un rôle dans les mesures de la sonde, rendant le contact précis difficile à certains points en raison des irrégularités de surface causées par le dépôt couche par couche et le façonnage.

3.2 La pièce fabriquée en aluminium CNC :

La pièce fabriquée par machine CNC a montré une précision globale plus élevée, avec des écarts inférieurs entre les dimensions théoriques et les mesures réelles. Cela est dû à la précision des machines utilisées pour l'usinage et à la dureté de l'aluminium, qui fournit une surface plus stable et dure pendant la mesure.

Les dimensions de la pièce sont plus symétriques, grâce à une technologie CNC avancée qui permet un usinage très précis.

En outre, le processus de montage sur la table de mesure était plus stable pour la pièce en aluminium, contribuant à des mesures plus précises sans problèmes de vibrations ou de mouvements incontrôlés.

3.3 conclusions :

Ces différences entre les deux pièces en termes de dimensions mettent en évidence l'influence de la méthode de fabrication et du matériau sur la précision dimensionnelle obtenue. Bien que l'impression 3D offre une grande flexibilité dans la conception et la fabrication, elle peut faire face à certains défis en termes de précision dimensionnelle en raison des propriétés du matériau et de la surface, tandis que la technologie CNC assure une plus grande précision et stabilité dimensionnelle, surtout lorsque des matériaux tels que l'aluminium sont utilisés.

4. analyses de résultats de mesure géométrique :

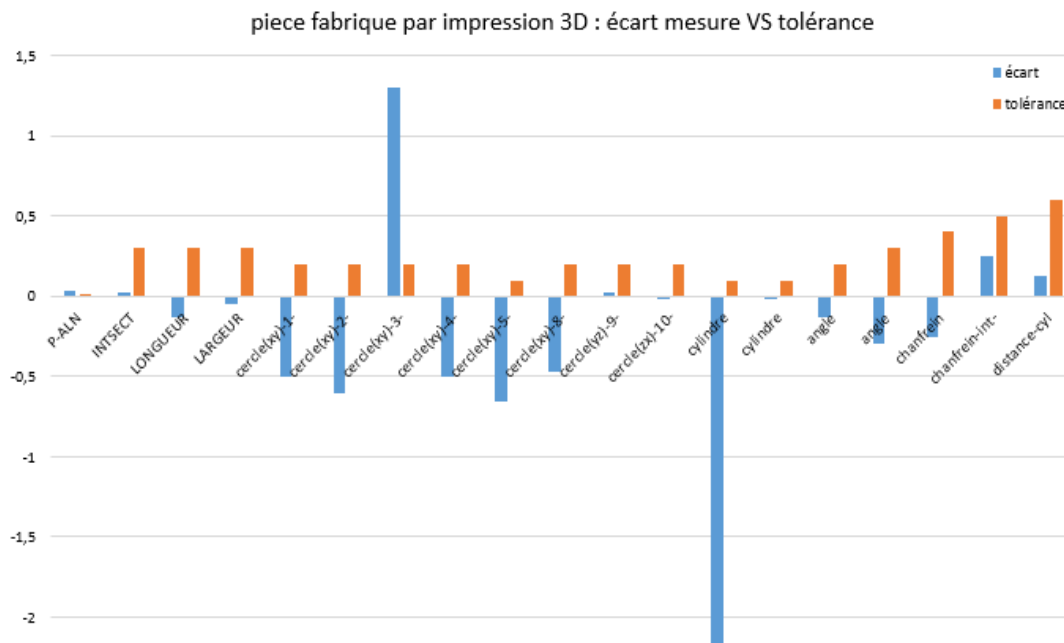


Figure IV.5 : Mesurer les écarts et les tolérances de la pièce imprimée en 3D.

Plusieurs propriétés géométriques ont été utilisées pour mesurer la pièce imprimée 3D : longueurs, diamètres, angles, plans et cylindres.

Les résultats révèlent des différences notables par rapport aux dimensions théoriques, en particulier en ce qui concerne les caractéristiques circulaires et les tolérances fines.

4.1 Lecteur de graphique :

Il est clair que de nombreuses caractéristiques dépassent les tolérances imposées, et en particulier :

- **P-ALN** : La déviation est de 0,03 mm pour une tolérance de 0,01 mm n'est pas compatible.
- **Cercles (xy-1 à xy-10)** : Dans la plupart des cas, les écarts sont entre 0,10 mm et 0,19 mm, tandis que les tolérances très serrées (0,05 mm) ne sont pas compatibles.
- **Cylindre et plan** : écart de 0,12 mm tandis que la tolérance est de 0,01 MM.

4.2 Explication :

Ces différences peuvent s'expliquer par de nombreux facteurs inhérents à la fabrication additive :

- **Résolution limitée de la technologie FDM** : en particulier dans la reproduction des détails fins et des formes circulaires, en raison de la buse, de la température de dépôt et de l'épaisseur de la couche.
- **Déformation thermique** : Pendant le refroidissement, le matériau peut se rétrécir ou se déformer, affectant les dimensions finales.
- **Paramètres d'impression non optimisés** : tels que la vitesse de dépôt, le type de remplissage ou la résolution horizontale/verticale.

4.3 Conséquences de la conformité :

Sur les 17 propriétés mesurées, 11 ne respectent pas les tolérances spécifiées, ce qui constitue un écart significatif du point de vue de la qualité géométrique.

La pièce imprimée ne peut donc pas être utilisée dans un contexte industriel exigeant des tolérances étroites, notamment en montage mécanique.

5. Analyses de résultats – pièce usinée CNC :

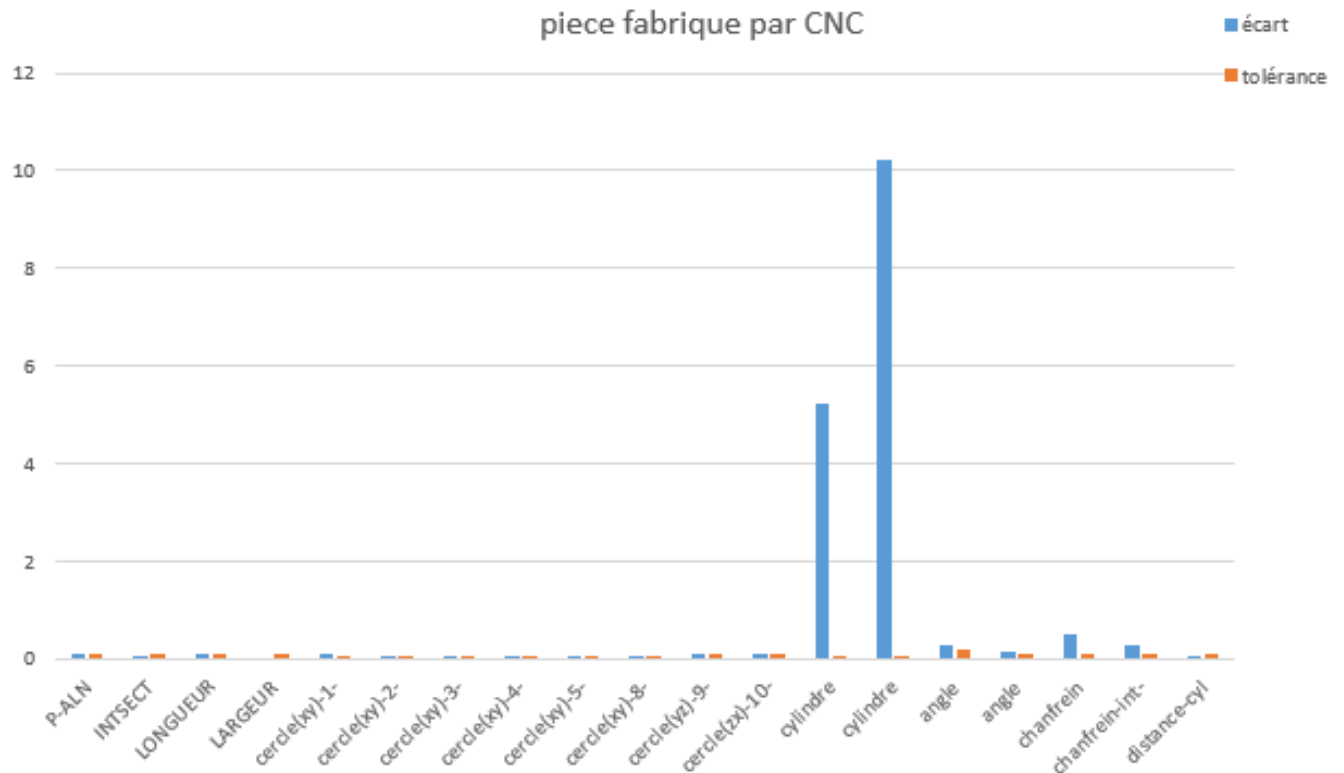


Figure IV.6 : Mesurer les écarts et les tolérances de la pièce Usiné en CNC.

La pièce fabriquée par la machine CNC a été soumise aux mêmes mesures que la pièce imprimée, afin de comparer objectivement les deux méthodes. Les résultats montrent un meilleur contrôle dimensionnel, avec généralement de petits écarts

5.1 Lecteur de graphique :

Le deuxième diagramme montre, pour chaque caractéristique :

- **L'écart mesure** entre la valeur théorique et la valeur réelle (à partir du MMT).
- **Tolérances admissibles**, déterminées conformément aux prescriptions du plan de fabrication.

En général, les écarts sont contenus et la tolérance est respectée dans la majorité des cas :

- **P-ALN** : Écart de 0,11 mm avec une tolérance de 0,10 mm légèrement en dehors de la tolérance, mais proche.

- **Longueur, largeur** : tous compatibles.
- **Cercles (xy)** : écarts entre 0,07 mm et 0,12 mm pour des tolérances de 0,05 mm légèrement au-dessus de la limite.
- **Cylindre et plan** : écart de 0,11 mm pour une tolérance de 0,01 mm non compatible, ce qui peut être expliqué par des défauts d'alignement ou de finition.
- **Angle** : petit écart de 0,03 mm pour une tolérance de 0,10 mm Très bon résultat.

5.2 Explication :

Les processus d'usinage CNC offrent une précision beaucoup plus élevée, mais certains défauts se produisent encore. Cela peut être lié à :

- **État de l'outil de coupe** : usure, vibrations ou manque de rigidité.
- **Paramètres de la machine** : même dans la CNC, une erreur d'étalonnage ou une mauvaise installation peuvent provoquer un défaut.
- **Les processus de finition sont absents ou insuffisants** dans certains domaines, comme les cylindres qui ont montré des mesures pauvres

5.3 Conséquences de la conformité :

Sur les 17 caractéristiques mesurées, la majorité étaient conformes, avec seulement 3 à 4 écarts dépassant légèrement la tolérance. Cela confirme la fiabilité de l'usinage CNC pour les applications nécessitant des tolérances serrées.

6. Une comparaison compositionnelle entre l'impression 3D et l'impression numérique :

Critère	Impression 3D	CNC
Ecart moyenne	Plus élevés, variables	Plus faibles, métrisés
Taux de conformité	Faible	Elevé
Forme circulaire	Très imprécise	Précise
Application adapté	Prototype visuelle	Production fonctionnelle

Tableau IV.4 : Comparaison compositionnelle entre l'impression 3D et l'impression numérique.

7. Tableaux de comparaison avec FIGS :

7.1 Écart moyen, maximum et taux de conformité :

Paramètres	Impression 3D	CNC
Ecart moyenne	≈0.115mm	≈0.083 mm
Ecart maximum	≈0.23 mm (angle)	≈0.12 mm (P-ALN)
Tolérance moyenne autorisée	≈0.056 mm	≈0.059mm
Nombre de points correspondants	6/17	13/17
Taux de confirmé	35%	76%

Tableau IV.5 : Comparaison Écart moyen, maximum et taux de conformité.

Sur la base des données obtenues :

- L'usinage CNC est généralement plus précis (écart moyen et écart minimum)
- L'usinage CNC a un taux de correspondance beaucoup plus élevé par rapport aux autorisations spécifiées

L'impression 3D, dans ce cas spécifique, présente de plus grands écarts et un moindre pourcentage de propriétés respectant les tolérances

7.2 Analyse des types d'erreurs courants :

Caractéristique	3D : Non-conformité	CNC : Non-conformité
Alignement (P-ALN)	Oui	Légère
Intersection	Conforme	Conforme
Longueur / largeur	Légère écart	Très précis
Cercles (xy)	10 non conformes	2 à 3 hors tolérance
Cylindres et plans	Mauvaise qualité	Moyenne
Angle	Mauvaise	Très bon

Tableau IV.6 : Analyse des types d'erreurs courants.

Conclusion :

Les résultats des mesures effectuées dans ce chapitre ont mis en évidence l'importance fondamentale de la machine à mesurer tridimensionnelle (MMC) pour le contrôle de la qualité dimensionnelle. Avec sa grande précision et sa capacité à mesurer de manière fiable des caractéristiques complexes, la machine de mesure par coordonnées s'est révélée un outil essentiel pour comparer objectivement deux méthodes de fabrication distinctes : l'impression 3D et l'usinage CNC.

Les mesures effectuées ont permis de déterminer les écarts dimensionnels, de définir les zones critiques de chaque pièce et d'évaluer le taux de conformité par rapport aux tolérances établies. Sans la contribution du MMT, une telle comparaison objective et détaillée n'aurait pas été possible. Il a mis en évidence les limites actuelles de l'impression 3D, notamment en termes de régularité et de précision géométrique, par rapport à une technologie plus mature telle que la CNC.

En outre, le MMT a facilité la traçabilité des défauts, leur localisation précise sur les pièces et la génération de rapports fiables, ce qui constitue un atout clé dans l'approche de la qualité industrielle.

Pour récapituler, ce chapitre a démontré que la machine à mesurer par coordonnées n'est pas simplement un instrument de mesure, mais un outil d'analyse qui guide les choix technologiques et améliore la conception et la fabrication des pièces, peu importe les procédés utilisés.

Conclusion générale :

Cette mémoire a porté sur une étude comparative de la qualité géométrique des pièces fabriquées à l'aide de deux procédés différents : l'usinage CNC et l'impression 3D, par des mesures précises effectuées avec une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT). L'objectif principal était d'évaluer la précision dimensionnelle obtenue par chacun de ces deux procédés, en vérifiant d'abord la fiabilité de l'instrument de mesure utilisé.

Initialement, une attention particulière a été accordée à la machine de mesure des coordonnées elle-même, en raison de son rôle essentiel dans le projet. La phase de validation a été menée avec une pièce en aluminium de référence, mesurée quatre fois à différentes dates. Cette étape a démontré la stabilité, la reproductibilité et la fiabilité de la machine à mesurer par coordonnées, conditions essentielles pour assurer la validité des mesures ultérieures.

Ensuite, les pièces produites avec l'impression 3D et l'usinage CNC ont été mesurés et comparés. Les résultats ont révélé de plus grandes aberrations géométriques des pièces imprimées, en raison des limitations inhérentes à la fabrication additive, y compris le retrait, l'épaisseur accrue et les inexactitudes liées à la précision des imprimantes 3D. En revanche, les pièces usinées CNC ont montré une meilleure concordance avec les dimensions théoriques, grâce à la stabilité et la précision des machines-outils CNC. L'étude a également révélé que le choix du procédé de fabrication dépend fortement des exigences techniques du produit final. L'impression 3D offre une liberté de conception, une rapidité de prototypage et des économies sur les matériaux, mais elle est encore limitée en termes de précision dimensionnelle. Quant à l'usinage CNC, bien qu'il soit plus restrictif dans la conception, il assure une très haute précision des pièces finies.

Enfin, ce travail souligne l'importance de la mesure 3D dans l'industrie moderne. Les machines à coordonnées 3D se sont révélées être un outil fiable et indispensable pour le contrôle de la qualité, la validation de la production et l'aide à la décision lors du choix d'un processus de fabrication.

Cette thèse ouvre également des perspectives pour de futures recherches, en particulier l'analyse de rugosité et les propriétés mécaniques des pièces imprimées et usinées, ainsi que l'intégration d'un logiciel de simulation permettant d'anticiper les déviations géométriques avant production.

Référence :

- [1] P. Bourdet, "Logiciels des machines à mesurer tridimensionnelles " Techniques de l'ingénieur, traité Mesures et Contrôle, R 1 316, 1999
- [2] DAVID, J. M., LELEU, S., BAUDOUIN, C., & GIBARU, O. (2007). Création d'un « étalon métrologique » d'une roue dentée sur Machine à Mesurer Tridimensionnelle
- [3] DAVID, J. M., LELEU, S., BAUDOUIN, C., & GIBARU, O. (2007). Création d'un « étalon métrologique » d'une roue dentée sur Machine à Mesurer Tridimensionnelle
- [4] Handbook of Coordinate Measuring Machines"— Robert J. Hocken & Paulo H. Pereira : Ce livre propose un guide complet sur les MMT et leurs applications industrielles.
- [5] HULL CW, "Appareils de production d'objets tridimensionnels parstéréolithographie", Brevets Google, 1986.
- [6] <https://www.fabulous.com.co/>, site consulté le 19/09/2020. [En ligne]
- [7] « Qu'est-ce que l'impression 3D ? » [En ligne]. Disponible sur : <https://www.investopedia.com/terms/1/3d-printing.asp>
- [8] C. Barlier et A. Bernard, Fabrication additive : Du prototypage rapide à l'impression 3D. Dunod, 2015.
- [9] « Fused Deposition Modeling | FDM 3D Printer Technology ». [En ligne]. Disponible sur : <https://www.creativitybuzz.org/fused-deposition>
- [10] : Imprimante 3D fonctionnement - Comment ça marche ? | PRIMANTE3D
- [11] : L'impression 3D par Stéréo lithographie, POINT D'ENCRE vous explique tout ! - Blog de la marque Point d'Encre (pointdencre.fr)
- [12] : https://www.researchgate.net/figure/The-principle-of-PolyJet-Matrix-method-Proto-3000-2013_fig2_310469956 ?
- [13] : <https://fabric-advanced-biology.univ-lyon1.fr/ceramic-printer-3d-ceram>
- [14] <http://www.primante3d.com/materiaux/>, Site consulté le 21/09/20. [En ligne]
- [15] <http://www.tunisieindustrie.nat.tn/fr/download/cepi/notes/Impression-3D.pdf/>, site consulté le 20/09/2020. [En ligne]