

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



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

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : fabrication mécanique

Présenté par :

Korichi Leila & Zouak anfal

Thème

**DEVELOPPEMENT D'UN PROTOCOLE METROLOGIQUE SUR MMT
POUR L'ANALYSE DES SPECIFICATIONS GEOMETRIQUES DES PIECES
MECANIQUES**

Devant le jury composé de :

| NOM et Prénom | Grade | Qualité |
|----------------------|--------------|----------------|
| Amroune Salah | Prof | Président |
| Slamani Mohamed | Prof | Encadreur |
| Khaldoune Abd Raouf | Doctorant | Examineur |

Année Universitaire : 2022 / 2023

N° d'ordre : GM/...../2023

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu notre Créateur.

Nous tenons à exprimer notre gratitude et notre appréciation au superviseur Dr. Mohamed Slamani qui a accepté de diriger ce travail et a mis à notre disposition tous les moyens qui nous ont permis de mener à bien cette étude et aussi pour ses précieux conseils et encouragements.

Nous tenons également à remercier. M. Tarek BIDI Pour ses efforts incessants et son aide précieuse.

Enfin, pour tous les étudiants de notre classe et nous souhaitons le meilleur Courage à tous les étudiants pour compléter ces études, et à tous les professeurs de l'Université Mohamed Boudiaf de Msila.

DÉDICACE

Nous nous dédions à cette travaille

À nos chers parents

Pour nos frères et sœurs

À tous nos proches

À tous les enseignants

Tous nos amis

Résumé :

Ce mémoire a pour objectif de développer un protocole métrologique pour l'analyse des spécifications géométriques des pièces mécaniques en utilisant une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT). Une pièce modèle, nommée "HEXBLOCK WIREFRAME SURFACE", a été sélectionnée pour cette étude. L'analyse expérimentale approfondie de cette pièce a permis d'acquérir une compréhension précise des mesures les plus importantes pour le développement du protocole. Les caractéristiques géométriques telles que la planéité, la perpendicularité, la circularité, la cylindricité, la coaxialité et la concentricité sont mesurées avec précision à l'aide de la MMT. Les données de mesure sont ensuite analysées à l'aide de logiciels de traitement des données pour évaluer la précision et la fiabilité de la méthode de mesure. Des ajustements sont effectués si nécessaire pour améliorer la précision des mesures. L'étude de la pièce modèle HEXBLOCK WIREFRAME SURFACE joue un rôle essentiel dans le développement d'un protocole métrologique fiable et précis pour l'analyse des spécifications géométriques des pièces mécaniques, garantissant ainsi la conformité aux normes de qualité requises.

ملخص:

تهدف هذه الدراسة الى تطوير بروتوكول مترو لوجي لتحليل المواصفات الهندسية للأجزاء الميكانيكية باستخدام آلة قياس الإحداثيات (MMT). تم اختيار جزء نمذجي يسمى (HEXBLOCK WIREFRAME SURFACE) لهذه الدراسة. قدم التحليل التجريبي المتعمق لهذه القطعة فهما دقيقا لأهم التدابير لتطوير البروتوكول. يتم قياس الخصائص الهندسية مثل التسطیح والعمودية والدائرية والأسطوانية والمحورية والتركيز بدقة باستخدام (MMT). م يتم تحليل بيانات القياس باستخدام برنامج معالجة البيانات لتقييم دقة وموثوقية طريقة القياس. يتم إجراء التعديلات إذا لزم الأمر لتحسين دقة القياسات. تلعب دراسة جزء نمذج (HEXBLOCK WIREFRAME SURFACE) دورا أساسيا في تطوير بروتوكول مترو لوجي موثوق ودقيق لتحليل المواصفات الهندسية للأجزاء الميكانيكية، وبالتالي ضمان الامتثال لمعايير الجودة المطلوبة.

Abstract:

This thesis aims to develop a metrological protocol for the analysis of geometrical specifications of mechanical parts using a coordinate measuring machine (CMM). A model part, named "HEXBLOCK WIREFRAME SURFACE", was selected for this study. The in-depth experimental analysis of this piece provided an accurate understanding of the most important measures for the development of the protocol. Geometric characteristics such as flatness, perpendicularity, circularity, cylindricity, coaxiality and concentricity are accurately measured using CMM. The measurement data is then analyzed using data processing software to assess the accuracy and reliability of the measurement method. Adjustments are made if necessary to improve the accuracy of the measurements. The study of the HEXBLOCK WIREFRAME SURFACE model part plays an essential role in the development of a reliable and accurate metrological protocol for the analysis of geometric specifications of mechanical parts, thus ensuring compliance with the required quality standards.

SOMMAIRE

Tableaux de matière

| | |
|--|----|
| Introduction générale..... | i |
| Chapitre I : SPÉCIFICATIONS GÉOMÉTRIQUES ET TOLÉRANCEMENT | |
| Introduction | 01 |
| I.1 Définition Spécification géométrique..... | 01 |
| I.2 Principe du maximum de matière..... | 01 |
| I.2.1 Le principe de cotation au maximum de matière..... | 01 |
| I.3 Tolérancement..... | 03 |
| I.3.1 Chaîne de tolérancement..... | 04 |
| I.3.2 Tolérances géométriques..... | 05 |
| I.3.3 Tolérances géométriques de forme..... | 05 |
| I.3.4 Tolérances géométriques de position..... | 07 |
| I.3.5 Tolérances géométriques d'orientation..... | 09 |
| I.4 Tolérances géométriques de battement..... | 10 |
| I.4.1 Battement simple et battement total..... | 10 |
| I.4.2 Battement circulaire..... | 10 |
| I.4.3 Battement total..... | 11 |
| I.5 Zone de tolérance | 12 |
| I.6 Analyse des tolérances..... | 12 |
| I.7 Les références..... | 12 |
| I.7.1 Les contraintes entre les références..... | 12 |
| I.7.2 Référence simple..... | 12 |
| I.7.3 Référence commune..... | 13 |
| I.7.4Système de références spécifiées..... | 13 |
| I.8 État de surface..... | 14 |
| I.8.1Paramètres de la rugosité..... | 15 |
| I.8.2 Mesure de la rugosité..... | 15 |
| Conclusion | 16 |
| Chapitre II : METROLOGIE DES COORDONNEES | |
| Introduction..... | 17 |
| II.1. Machine à mesurer tridimensionnelles..... | 17 |
| II.1.1Présentation générale des Machines à mesurer..... | 17 |
| II.1.1.1 Histoire de la machine de mesurer à coordonnées..... | 17 |
| II.1.1.2 Les premiers palpeurs..... | 18 |
| II.1.1.3 L'ordinateur..... | 18 |
| II.1.1.4 Le palpeur électronique à contact..... | 18 |
| II.1.1.5 Différents modèles de MMT..... | 19 |
| II.1.2 Principaux composants de la MMT | 21 |
| II.1.3Programmation de la MMT..... | 22 |
| II.1.3.1 Programmation manuel..... | 22 |
| II.1.3.2 Programmation automatique..... | 23 |

| | | |
|---|---|----|
| II.1.4 | Incertitude de mesure de la MMT | 23 |
| II.1.5 | Aperçu de la planification de l'inspection..... | 24 |
| II.1.5.1 | Processus d'inspection..... | 24 |
| II.2 | Automatisation de la programmation MMT..... | 25 |
| II.2.1 | Orientation des pièces..... | 27 |
| II.2.2 | Inspection visuelle | 28 |
| II.3 | Accessibilité | 29 |
| II.3.1 | Accessibilité des fonctionnalités pour l'inspection | 29 |
| II.3.2 | Sens d'approche de l'outil..... | 31 |
| II.4 | Détermination des points de mesure..... | 32 |
| II.5 | Planification de la trajectoire pour l'inspection MMT..... | 34 |
| II.6 | Calibrage palpeur et scanner..... | 36 |
| II.6.1 | le palpeur..... | 36 |
| II.6.2 | Calibrage d'un palpeur..... | 39 |
| II.6.3 | Calibrage d'un scanner..... | 40 |
| II.7 | Détection et évitement des collisions..... | 41 |
| II.8 | Résumé de la littérature actuelle..... | 42 |
| | Conclusion..... | 44 |
| Chapitre III : TECHNIQUES DE MESURE DES DEFAUTS GEOMETRIQUES | | |
| | Introduction..... | 45 |
| III.1 | Logiciel de control (PC-DMIS)..... | 45 |
| III.2 | Mesure par contact..... | 45 |
| III.3 | Mesure à distance..... | 46 |
| III.4 | Établissement des références..... | 46 |
| III.5 | Automatisation de l'inspection..... | 47 |
| III.5.1 | Présentation..... | 47 |
| III.5.2 | Alignement des pièces..... | 47 |
| III.5.2.1 | L'alignement..... | 47 |
| III.5.2.2 | Alignement 3-2-1..... | 47 |
| III.5.2.3 | Alignement manuelle..... | 47 |
| III.5.2.4 | Alignements automatiques..... | 48 |
| III.5.2.5 | Alignements Best Fit..... | 49 |
| III.5.2.6 | Alignement itératif..... | 51 |
| | CONCLUSION..... | 53 |
| Chapitre IV : ETUDE DE CAS INSPECTION D'UNE PIECE MODELE SUR MMT | | |
| | Introduction | 55 |
| IV.1 | Hexagone Metrology..... | 56 |
| IV.2 | Equipements utilisés..... | 56 |
| IV.2.1 | Machine de mesure tridimensionnelle MMT..... | 56 |
| IV.2.2 | Capture (Système CMS106 sur MMT)..... | 56 |
| IV.2.3 | Logiciel PC-DIMIS..... | 58 |
| IV.2.4 | Plans pièce modèle..... | 59 |
| IV.2.5 | CAO Pièce modèle..... | 60 |
| IV.2.6 | Pièce modèle..... | 60 |
| IV.3 | Protocole métrologique sur MMT pour l'analyse des spécifications géométriques des | |

| | |
|--|-----------|
| pièces mécaniques..... | 61 |
| IV.4 Alignement 3-2-1..... | 62 |
| IV.5 Mesure par contact et Mesure à distance..... | 62 |
| IV.5.1 Mesure d'un cylindre..... | 62 |
| IV.5.2 Mesure d'un cône..... | 63 |
| IV.5.3 Mesure d'un cercle..... | 64 |
| IV.5.4 Mesure d'une sphère..... | 65 |
| IV.5.5 Mesure un polygone..... | 66 |
| IV.6 Générer un rapport..... | 67 |
| Conclusion..... | 68 |
| Conclusion général..... | 69 |
| Annexe..... | 70 |

Liste des figures

Chapitre I

| | |
|--|----|
| Figure I.1 : Exemple de cotation au maximum de matière..... | 02 |
| Figure I.2 Cas maximum de matière et minimum de matière..... | 03 |
| Figure I.3 : Chaîne de tolérancement..... | 05 |
| Figure I.4 Tolérancement d'une génératrice du cylindre..... | 06 |
| Figure I. 5 Tolérance de planéité..... | 06 |
| Figure I.6 Tolérance de circularité..... | 06 |
| Figure I.7 Tolérance de cylindricité..... | 07 |
| Figure I.8 Tolérance de localisation..... | 08 |
| Figure I.9 Tolérance de Co-axialité..... | 08 |
| Figure I.10 Tolérance de symétrie..... | 08 |
| Figure I.11 Tolérance de parallélisme..... | 09 |
| Figure I.12 Tolérance de perpendicularité..... | 10 |
| Figure I.13 Battement circulaire..... | 10 |
| Figure I.14 Battement total..... | 11 |
| Figure I.15 Zone de tolérance..... | 12 |
| Figure I.16 Référence simple..... | 13 |
| Figure I.17 Référence commune..... | 13 |
| Figure I.18 Système de références..... | 14 |
| Figure I.19 Décomposition d'une surface mesurée..... | 14 |
| Figure I.20 Critères de rugosité..... | 15 |

Chapitre II

| | |
|--|----|
| Figure II .1 : Création de DEA en Italie et réalisation la même année d'Alpha, la première machine à mesurer tridimensionnelle 1963..... | 17 |
| Figure II.2 : Ancien palpeur..... | 18 |
| Figure II.3 : Palpeur à déclenchement par contact..... | 19 |
| Figure II.4 : Différents modèles de MMT..... | 20 |
| Figure II.5 : machine de mesure de coordonnées(mmt)..... | 21 |
| Figure II.6 : Composants de la machine à mesurer..... | 22 |
| Figure II.7 : Programmation manuel..... | 22 |
| Figure II.8 : Programmation automatique..... | 23 |
| Figure II.9 : Les concepts de base de la métrologie..... | 24 |
| Figure II.10 : Processus d'inspection..... | 25 |
| Figure II.11 :générer automatiquement le programme de mesure..... | 26 |
| Figure II.12: La machine à mesurer GLOBAL..... | 28 |
| Figure II.13 : Inspection visuelle..... | 29 |
| Figure II.14 : Démarche de planification des trajectoires..... | 36 |
| Figure II.15 : Considérations sur le palpeur..... | 36 |
| Figure II.16 : Palpeurs à indexation manuelle..... | 37 |
| Figure II.17 : configuration d'un palpeur..... | 38 |
| Figure II.18 : Etalonnage du palpeur..... | 39 |
| Figure II.19 : Calibrage d'un palpeur..... | 40 |

| | |
|--|-----------|
| Figure II.20 : plan de sécurité..... | 41 |
| Figure II.21 : Barre d'outils graphiques..... | 42 |

CHAPITRE III

| | |
|--|-----------|
| Figure III.1: palpation par contacte..... | 46 |
| Figure III.2 : mesure avec CMS106..... | 46 |
| Figure III.3 : Mesure d'un plan par trois points..... | 48 |
| Figure III.4 : Direction de palpation..... | 48 |
| Figure III.5: Alignements Best Fit..... | 50 |
| Figure III.6 : Modification des poids..... | 50 |
| Figure III.7 : exemple Best Fit 2D..... | 51 |
| Figure III.8 : Création d'un alignement Best Fit..... | 51 |
| Figure III.9 : Création d'un alignement itératif..... | 52 |

CHAPIRE IV

| | |
|---|-----------|
| Figure IV.1 : Pièce modèle (HEXBLOCK WIREFRAME SURFACE)..... | 55 |
| Figure IV. 2 : MMT HEXAGON GLOBAL..... | 57 |
| Figure IV. 3. Système CMS106 sur MMT..... | 57 |
| Figure IV.4 : Plans pièce modèle..... | 59 |
| Figure IV.5 : Pièce modèle CAO..... | 60 |
| Figure IV.6 : Pièce modèle plastique..... | 60 |
| Figure IV.7: Mesure un cylindre..... | 62 |
| Figure IV.8: Mesure d'un cône..... | 63 |
| Figure IV.9 : mesure d'un cercle..... | 64 |
| Figure IV.10 : mesure d'une sphère..... | 65 |
| Figure IV.11 : mesure d'un polygone..... | 66 |

Liste des Tableaux

CHAPITRE I

| | |
|--|-----------|
| Tableau I.1 : Exemple de calcul de la tolérance de rectitude d'un arbre au maximum matière..... | 02 |
| Tableau : I.2 Symboles des tolérances..... | 4 |
| Tableau I.3 Différents types de Battement..... | 11 |

CHAPITRE IV

| | |
|--|-----------|
| Tableau IV.1 : propriétés Système CMS106..... | 58 |
|--|-----------|

Introduction générale

Le développement d'un protocole métrologique pour l'analyse des spécifications géométriques des pièces mécaniques sur une machine de mesure tridimensionnelle (MMT) est une étape essentielle du processus de contrôle qualité. Les spécifications géométriques définissent les tolérances et les exigences de forme, de taille et d'orientation des pièces, et il est crucial de mesurer avec précision ces paramètres pour garantir la conformité aux normes et aux attentes des clients.

Un protocole métrologique est un ensemble de procédures et de directives qui précisent les méthodes et techniques de mesure à utiliser pour évaluer les spécifications géométriques des pièces mécaniques. Il est développé en se basant sur les normes de métrologie en vigueur, telles que les normes ISO, ainsi que sur les exigences spécifiques de l'industrie ou de l'entreprise.

Le développement d'un tel protocole commence par une étude approfondie des spécifications géométriques des pièces concernées et des instruments de mesure disponibles sur la MMT. Il est essentiel de comprendre les différentes caractéristiques géométriques à mesurer, telles que la planéité, la circularité, la perpendicularité, la coaxialité, etc., ainsi que les méthodes appropriées pour les évaluer.

Une fois que les spécifications géométriques sont définies et les méthodes de mesure sélectionnées, le protocole métrologique doit inclure des instructions détaillées sur la configuration de la MMT, la préparation des pièces, la fixation des capteurs et les paramètres de mesure. Des critères d'acceptation ou de rejet doivent également être établis, en se basant sur les tolérances spécifiées dans les plans de fabrication.

Le protocole métrologique doit être rigoureusement testé et validé pour garantir sa précision et sa fiabilité. Cela peut impliquer la réalisation de mesures de référence sur des pièces étalons dont les caractéristiques géométriques sont connues avec précision. Les résultats des mesures doivent être analysés et comparés aux valeurs attendues afin d'évaluer la conformité du protocole.

Problématique :

La problématique abordée dans ce mémoire porte sur le développement d'un protocole métrologique pour l'analyse des spécifications géométriques des pièces mécaniques sur une machine de mesure tridimensionnelle (MMT). L'objectif est de répondre aux défis rencontrés lors de la mesure précise des tolérances et des exigences de forme, de taille et d'orientation des pièces, afin de garantir la conformité des produits finis aux normes et aux attentes des clients.

Objectif :

L'objectif principal de ce mémoire est donc de développer un protocole métrologique robuste et efficace qui facilitera la mesure précise des spécifications géométriques des pièces mécaniques, contribuant ainsi à une meilleure qualité et conformité des produits finis.

Sous objectifs :

- Développer un protocole métrologique rigoureux et adapté pour évaluer les spécifications géométriques des pièces mécaniques sur une MMT.
- Étudier en détail les différentes caractéristiques géométriques à mesurer, telles que la planéité, la circularité, la perpendicularité, la coaxialité, etc., ainsi que les méthodes appropriées pour les évaluer.
- Définir les instructions précises pour la configuration de la MMT, la préparation des pièces, la fixation des capteurs et les paramètres de mesure.
- Établir des critères d'acceptation ou de rejet basés sur les tolérances spécifiées dans les plans de fabrication.
- Tester et valider le protocole métrologique pour s'assurer de sa précision et de sa fiabilité, en comparant les résultats des mesures aux valeurs attendues.
- Fournir des recommandations pratiques pour l'application du protocole métrologique dans l'industrie, en vue d'améliorer le contrôle qualité des pièces mécaniques.

Plan du mémoire :

Le plan de ce mémoire est structuré de la manière suivante :

Chapitre I : Spécifications géométriques et tolérancement Dans ce chapitre, nous aborderons les fondements des spécifications géométriques des pièces mécaniques et leur importance dans le contexte du tolérancement. Nous examinerons en détail les différentes caractéristiques géométriques et leurs implications sur la conception et la fabrication des pièces.

Chapitre II : Métrologie des coordonnées Ce chapitre se concentrera sur les principes de base de la métrologie des coordonnées et sur les différentes technologies de mesure utilisées sur une MMT. Nous aborderons également les méthodes de calibration et de correction des erreurs de mesure, ainsi que les techniques de numérisation des pièces et de génération de modèles 3D.

Chapitre III : Techniques de mesure des défauts géométriques Dans ce chapitre, nous présenterons les principales techniques de mesure utilisées pour évaluer les défauts géométriques des pièces mécaniques. Nous examinerons les méthodes spécifiques à chaque caractéristique géométrique, telles que la planéité, la circularité, la perpendicularité, etc., ainsi

que les outils logiciels et les algorithmes de traitement des données utilisés pour l'analyse et l'évaluation des défauts géométriques.

Chapitre IV : Étude de cas - Inspection d'une pièce modèle sur MMT ce chapitre sera consacré à une étude de cas pratique portant sur l'inspection d'une pièce modèle représentative des spécifications géométriques étudiées. Nous décrirons la méthodologie de mesure, les paramètres de configuration utilisés sur la MMT, et analyserons les résultats obtenus en les comparant aux valeurs attendues.

Finalement, dans la conclusion de ce mémoire, nous récapitulerons les principaux résultats obtenus et discuterons des contributions de ce travail dans le domaine de la métrologie des spécifications géométriques des pièces mécaniques. Nous présenterons également les recommandations pratiques pour l'application du protocole métrologique développé, ainsi que les perspectives de recherche future et les possibilités d'amélioration.

À travers ce mémoire, nous cherchons à contribuer à l'amélioration des processus de contrôle qualité en fournissant un protocole métrologique robuste et fiable pour l'analyse précise des spécifications géométriques des pièces mécaniques. Le plan de ce mémoire est conçu pour approfondir les connaissances dans ce domaine et ouvrir de nouvelles perspectives pour la recherche et l'industrie.

Chapitre I

SPÉCIFICATIONS GÉOMÉTRIQUES ET TOLÉRANCEMENT

Introduction

Les spécifications géométriques et les tolérances sont des concepts clés en ingénierie et en fabrication. Les spécifications géométriques font référence à la définition de la forme, de la taille et de l'orientation d'une pièce, tandis que les tolérances font référence à la mesure de la variation acceptable de ces paramètres.

Les spécifications géométriques sont importantes car elles permettent de garantir la fonctionnalité et l'interchangeabilité des pièces. Ils transmettent les propriétés physiques de la pièce, telles que la taille, la forme, les angles, la planéité, la perpendicularité, etc.

La tolérance est une partie importante de la spécification géométrique car elle définit la plage de variation acceptable pour chaque caractéristique. Par exemple, une tolérance de +/- 0,1 mm signifie qu'une dimension donnée peut varier de 0,1 mm de part et d'autre de la valeur spécifiée sans affecter la fonctionnalité de la pièce.

I.1 Définition Spécification géométrique

La spécification géométrique permet d'assurer une distribution efficace du tolérancement et du jeu fonctionnel sur les différents éléments (surfaces) de la pièce en question, selon leurs degrés d'importance.

On peut diviser la spécification géométrique en deux catégories : Dimensionnement et tolérancement des assemblages, et dimensionnement et tolérancement des pièces isolées.

En ce qui concerne le dimensionnement et le tolérancement des pièces isolées, le concepteur décide de la distribution la plus efficace en se basant sur les différents types de tolérancement.

I.2 Principe du maximum de matière

Le principe du maximum de matière est un principe de tolérancement qui implique que l'état virtuel de l'élément tolérance et ci indiqué, l'état de forme parfaite au maximum de matière pour l'élément de référence ne soient pas dépassés. Le principe du maximum de la matière à l'élément tolérance permet une augmentation de la tolérance géométrique indiquée lorsque l'élément tolérance n'est pas à son état au maximum de matière sous réserve que l'élément ne dépasse pas l'état virtuel.

I.2.1 Le principe de cotation au maximum de matière

Le principe de cotation au maximum de matière est défini par la norme de l'AFNOR NF E04 555 :1992. C'est un principe qui modifie le principe de base d'indépendance en créant une relation particulière entre une tolérance dimensionnelle et une tolérance Géométrique. Dans l'avant-propos de la norme, il est précisé que l'appellation « principe du maximum de matière » utilisée dans le texte ISO doit être comprise comme « exigence du maximum de matière ». Cette exigence prend en compte la relation mutuelle de la dimension et de la tolérance géométrique concernée. +

Le but principal de l'exigence du maximum de matière est d'assurer un assemblage à moindre coût, ceci en acceptant l'utilisation des pièces qui, à la fois, ne satisfait pas

Chapitre I : : SPÉCIFICATIONS GÉOMÉTRIQUES ET TOLÉRANCEMENT

forcément tous les tolérancements imposés et se valides par le contrôle au gabarit. Toutefois, le maximum et minimum matière ne s'emploient jamais dans les liaisons avec serrage. L'exigence du maximum de matière est symbolisée par un M encadré dans le cadre de tolérance, à la suite de la valeur de la tolérance ou d'une référence, comme le montre la figure I.1 [1].

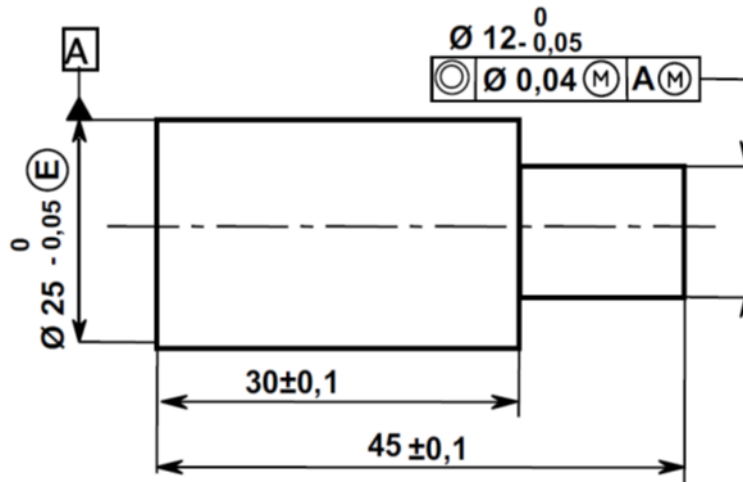


Figure I.1 : Exemple de cotation au maximum de matière.

Comme exemple, les spécifications référant à la figure I.2 imposent une tolérance sur le diamètre (50,00 maximal et 49,80 minimal) et une tolérance de rectitude au maximum de matière (0,2). Ces deux conditions font qu'au maximum de matière, le diamètre du cylindre enveloppe de la pièce atteint 50,20 (diamètre virtuel). Si le diamètre (pièce) diminue (à partir de 50,00), le jeu entre la pièce et le cylindre enveloppe augmente. Ce gain peut être ajouté à la tolérance de rectitude. Le tableau I.1 donne les différents cas :

| Diamètre réalisé | Gain obtenu | Nouvelle tolérance de rectitude | Diamètre de l'enveloppe |
|------------------|-------------|---------------------------------|-------------------------|
| 50,00 | 0 | 0,20 | 50,20 |
| 49,95 | 0,05 | $0,20 + 0,05 = 0,25$ | 50,20 |
| 49,90 | 0,10 | $0,20 + 0,10 = 0,30$ | 50,20 |
| 49,85 | 0,15 | $0,20 + 0,15 = 0,35$ | 50,20 |
| 49,80 | 0,20 | $0,20 + 0,20 = 0,40$ | 50,20 |

Tableau I.1 : Exemple de calcul de la tolérance de rectitude d'un arbre au maximum matière.

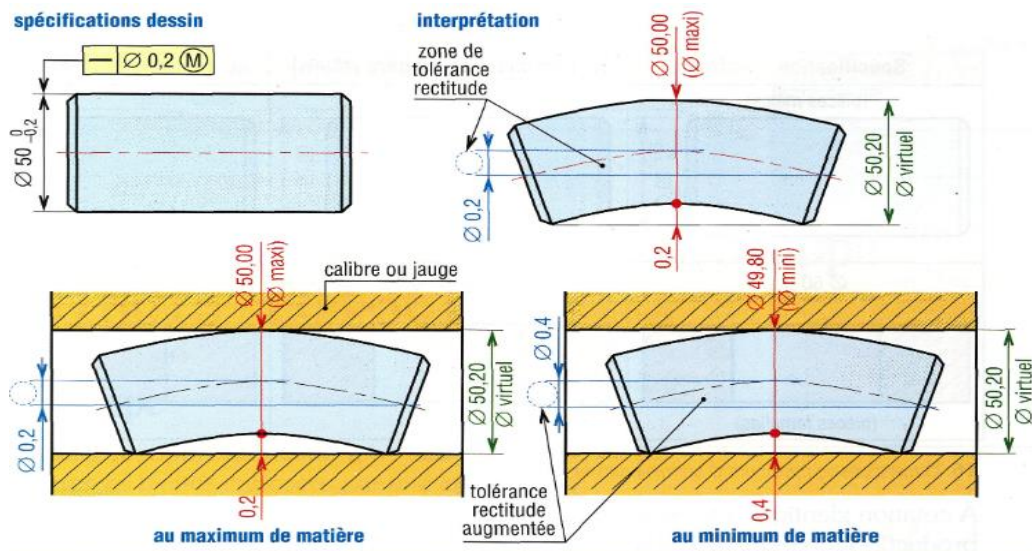


Figure I.2 : Cas maximum de matière et minimum de matière [3].

I.3 Tolérancement

Dans son principe général, le tolérancement consiste à exprimer sous forme de contraintes dimensionnelles et géométriques, les conditions de bon fonctionnement d'un mécanisme. C'est, à la base, un travail qui incombe aux ingénieurs et qui entre dans le cadre de la démarche de spécification fonctionnelle des produits.

La normalisation distingue deux types de spécifications principales : les tolérances dimensionnelles et les tolérances géométriques.

Les tolérances dimensionnelles portent sur des grandeurs de types longueur ou angle, c'est pourquoi on distingue trois sortes de tolérances dimensionnelles : Les tolérances linéaires, les tolérances angulaires et les tolérances radiales. Théoriquement, les tolérances dimensionnelles sont utilisées chaque fois que l'on porte une dimension sur le dessin d'une pièce. Pratiquement, seules quelques cotes dimensionnelles principales sont tolérances, les autres pouvant obéir à une tolérance générale. Ce type de tolérancement s'exprime par : $A \pm t$, Où A représente la dimension nominale et t représente l'intervalle de tolérance.

Les tolérances géométriques limitent l'écart de l'élément réel par rapport à : sa forme, son orientation et sa position exacte sans tenir compte de la dimension de l'élément. Ce type de tolérancement est très riche en possibilités, le tableau I.2 montre les quatre types de tolérance géométrique [1].

| Les tolérances géométriques - ISO 1101 | | | | |
|--|--|---------------|--|--|
| type de tolérances | cas | symbole (ISO) | observation | |
| tolérances de forme | rectitude | | s'utilisent sans élément de référence | |
| | planéité | | | |
| | circularité | | | |
| | cylindricité | | | |
| | profil d'une ligne | | | également utilisées avec tolérances de position, d'orientation et élément de référence |
| | profil d'une surface | | | |
| tolérances d'orientation | parallélisme | | s'utilisent avec élément de référence (axe, plan...) | |
| | perpendicularité | | | |
| | inclinaison | | | |
| tolérances de position | concentricité (centres) coaxialité (axes) | | | s'utilisent avec élément de référence (axe, plan...) |
| | symétrie | | | |
| | localisation | | | |
| tolérances de battement | battement circulaire | | s'utilisent avec élément de référence (axe, plan...) | |
| | battement total | | | |

Tableau I.2 : Symboles des tolérances [3].

I.3.1 Chaîne de tolérancement

La chaîne de tolérancement se compose de trois éléments principaux : La spécification Géométrique, la zone de tolérance et l'analyse et la synthèse de tolérance (Figure I.3).

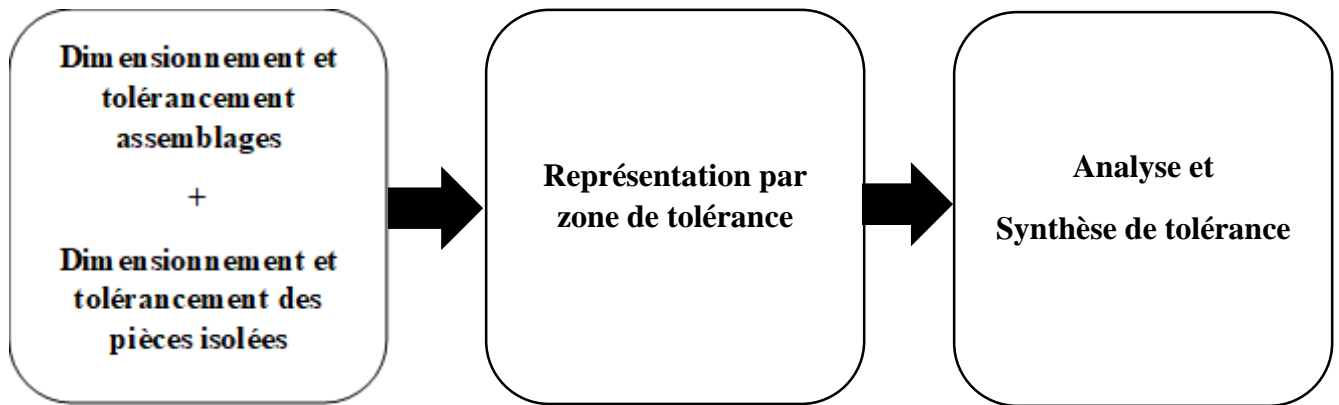


Figure I.3 : Chaîne de tolérancement [1].

I.3.2 Tolérances géométriques

Définition :

Comme il est maintenant reconnu, la nécessité d'avoir dans l'industrie des pièces mécaniques facilement interchangeables, et l'impossibilité humaine et technologique de produire des pièces mécaniques identiques (car une pièce ne peut pas être usinée de façon parfaite) ont abouti à l'introduction du concept de tolérance.

Les tolérances dimensionnelles nous donnent les valeurs limites des déviations des cotes de la pièce que l'on peut accepter de façon à ce qu'elle reste encore fonctionnelle.

La mise en place d'une tolérance dimensionnelle pour une pièce introduit certains avantages, car le fait de permettre d'accepter des pièces avec des défauts dans leurs dimensions nous permet de réduire les temps de fabrication et les coûts de production.

Malgré ces avantages obtenus par la mise en place des tolérances de dimension, celles-ci ne suffisent pas à garantir sa fonctionnalité. D'autres caractéristiques, comme l'orientation, la localisation, la forme et le battement, doivent être contrôlées en fonction de l'usage de la pièce. Le contrôle de ces caractéristiques est connu comme le contrôle des tolérances géométriques. Par la suite nous présentons les définitions des différentes tolérances géométriques [1].

I.3.3 Tolérances géométriques de forme

I.3.3.1 Tolérance de rectitude

La rectitude est une condition où un élément d'une surface ou d'un axe est une ligne droite. La tolérance de rectitude détermine une zone de tolérance dans laquelle l'axe ou l'élément considéré doit être situé. La tolérance de rectitude n'est associée à aucun élément de référence [2].

Interprétation :

Comme montré à la Figure I.3, la génératrice du cylindre doit être comprise entre 2 droites parallèles distantes de 0.02 mm.

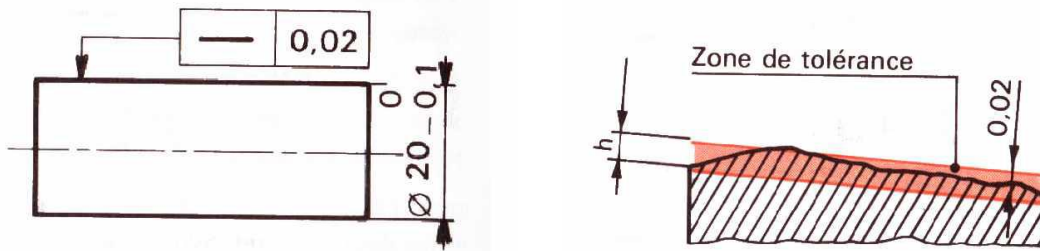


Figure I.4 : Tolérancement d'une génératrice du cylindre [27].

I.3.3.2 Tolérance de planéité

La planéité est l'état d'une surface ayant tous ses éléments sur un plan. La tolérance de planéité indique une zone de tolérance définie par deux plans parallèles dans laquelle la surface doit se trouver. La tolérance de planéité n'est associée à aucun élément de référence. La tolérance de planéité est normalement appliquée aux surfaces non interrompues [2]. Comme exemple, la surface présentée dans la figure I.5 doit être comprise entre 2 plans parallèles distants de 0.05 mm.



Figure I. 5 : Tolérance de planéité [27].

I.3.3.3 Tolérance de circularité :

La circularité est l'état d'une surface de révolution où :

- Par rapport à un cylindre ou à un cône, tous les points de la surface intersectés par un plan perpendiculaire à un axe commun sont équidistants de cet axe.
- Par rapport à une sphère, tous les points de la surface intersectés par un plan passant par un centre commun sont équidistants de ce centre.

La tolérance de circularité définit une zone de tolérance bornée par deux cercles concentriques dans laquelle chaque élément de la surface doit se trouver.

La tolérance de circularité n'est associée à aucun élément de référence. La tolérance de circularité peut être appliquée à tout élément (surfaces externes ou internes) qui est circulaire dans la section transversale [2].

Le contour du trou présenté à la figure I.6 doit être compris entre les 2 cercles concentriques de 0.05 mm.



Figure I.6 : Tolérance de circularité.

I.3.3.4 Tolérance de cylindricité :

La cylindricité est un état d'une surface de révolution dans laquelle tous les points de la surface sont équidistants d'un axe commun. La tolérance de cylindricité indique une zone de tolérance bornée par deux cylindres concentriques dans laquelle la surface doit se trouver. La tolérance de cylindricité n'est associée à aucun élément de référence. La tolérance de cylindricité est applicable seulement aux dispositifs cylindriques : cylindres intérieurs ou extérieurs.

La tolérance de forme quelconque indique une borne uniforme le long du profil réel souhaité dans lequel les éléments de dispositif (surface ou ligne) doivent se trouver. La tolérance de forme quelconque peut être appliquée à des formes composées par des arcs, des lignes, des surfaces planes ou incurvées, etc. [2].

Interprétation :

La figure I.7 montre que la surface considérée doit être comprise entre les 2 cylindres coaxiaux dont les rayons diffèrent de 0.05 mm.

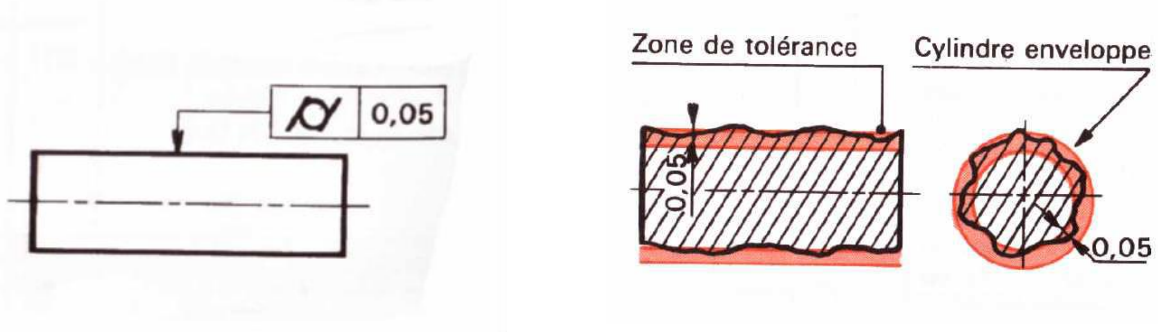


Figure I.7 : Tolérance de cylindricité.

I.3.4 Tolérances géométriques de position

I.3.4.1 Tolérance de localisation :

La localisation est la position théorique exacte d'un élément réel.

La tolérance de localisation indique une zone de tolérance définie par deux droites, deux plans, un cercle, un parallélépipède ou un cylindre à l'intérieur desquels doit se situer l'élément considéré. Pour la tolérance de localisation il faut obligatoirement définir la position et l'orientation de l'élément spécifié [2].

La figure 8 montre que l'axe du trou doit être compris dans une zone cylindrique de $\varnothing 0.1$ mm dont l'axe est dans la position théorique spécifiée.

A : appui plan : orientation.

C : butée.

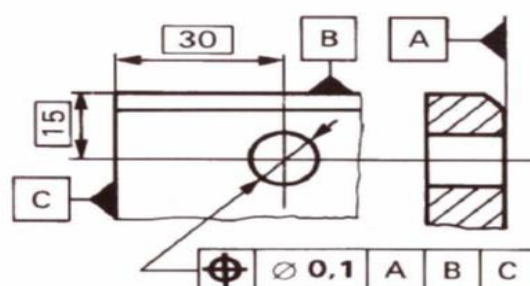


Figure I.8 : Tolérance de localisation.

I.3.4.2 Tolérance de Co axialité

La Co-axialité est la condition où les axes de la section transversale de tous les éléments de révolution (telle que des cylindres, des cônes, des sphères, etc.) soient communs à l'axe de l'élément de référence. La tolérance de Co-axialité est le diamètre de la zone cylindrique de tolérance dans laquelle l'axe de l'élément ou des éléments doit se trouver ; l'axe de la zone de tolérance doit coïncider avec l'axe de l'élément de référence.

La figure I.9 illustre que l'axe du $\varnothing 24h8$ doit être compris dans une zone de $\varnothing 0.02$ mm coaxial à l'axe du cylindre de référence $\varnothing 18h6$ [2].

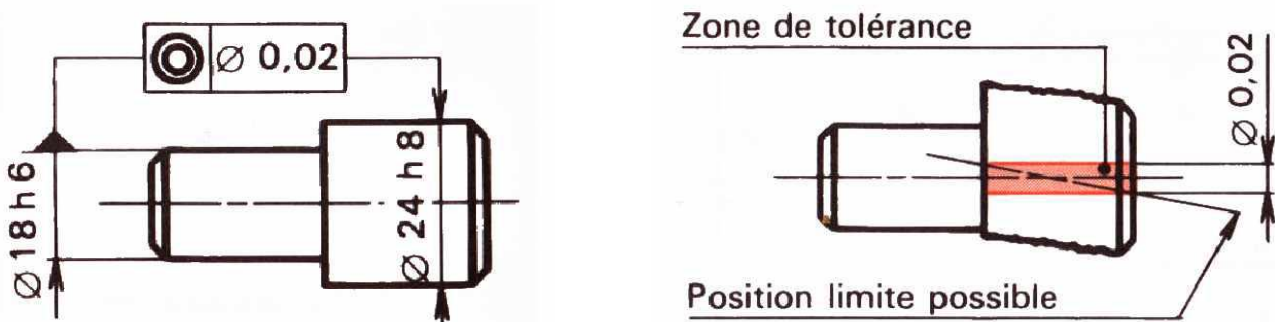


Figure I.9 : Tolérance de Co-axialité.

I.3.4.3 Symétrie

La symétrie est une condition dans laquelle un ou plusieurs éléments sont symétriquement disposés par rapport à un plan central ou médian d'un élément de référence. La tolérance de symétrie est la distance entre deux plans parallèles également disposés par rapport au plan central ou médian de l'élément de référence.

La zone de tolérance de la figure I.10 est limitée par 2 plans parallèles distants de h sont disposés symétriquement par l'axe du plan médian de référence [2].

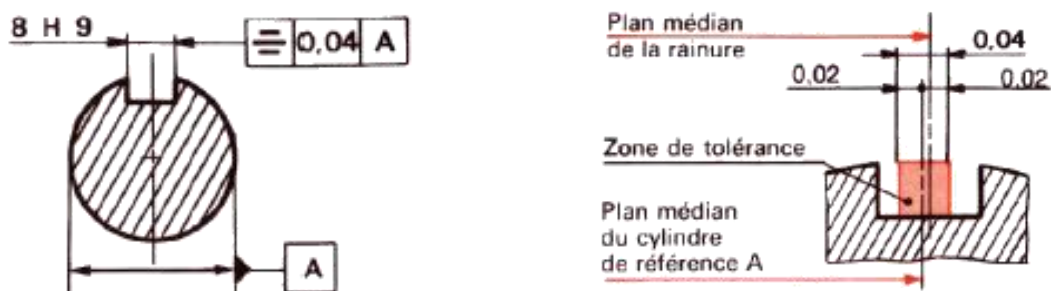


Figure I.10 : Tolérance de symétrie.

I.3.5 Tolérances géométriques d'orientation

I.3.5.1 Tolérance de parallélisme :

Le parallélisme est l'état d'une surface équidistante à tous les points d'un plan ou un axe équidistant sur sa longueur à un axe de référence. La tolérance de parallélisme indique :

- Une zone de tolérance définie par deux plans ou lignes parallèles à un plan ou un axe de référence et dans laquelle les éléments de la surface ou de l'axe du dispositif considéré doit se trouver.
- Une zone cylindrique dont l'axe est parallèle à un axe de référence dans laquelle l'axe du dispositif considéré doit se trouver.

La tolérance de parallélisme exige toujours un élément de référence qui est la référence pour le contrôle du dispositif dans son orientation.

Comme exemple, la surface B doit être comprise entre 2 plans Parallèles distants de 0.05 mm par rapport à la surface A (Figure I.11) [2].

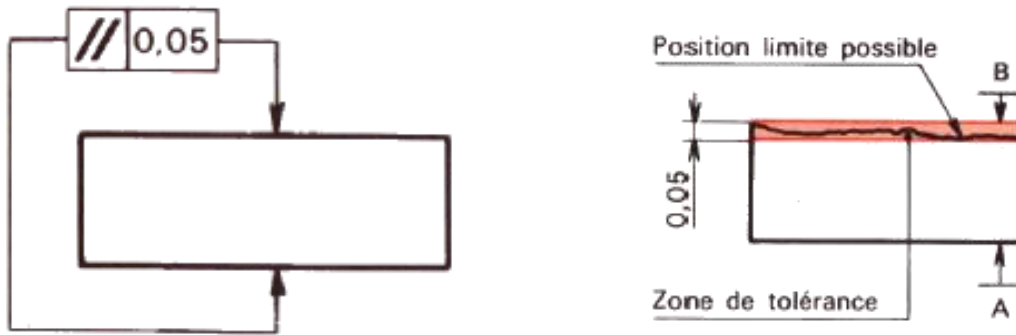


Figure I.11 : Tolérance de parallélisme.

I.3.5.2 Tolérance de perpendicularité :

La perpendicularité est l'état d'une surface, d'un plan médian ou d'un axe à un angle droit (90) avec un plan ou un axe de référence. Une tolérance de perpendicularité indique :

- Une zone de tolérance définie par deux plans parallèles, perpendiculaires à un plan ou à un axe de référence dans laquelle la surface ou le plan médian de l'élément considéré doit se trouver.
- Une zone de tolérance définie par deux plans parallèles, perpendiculaires à un axe de référence dans laquelle l'axe de l'élément considéré doit se trouver.
- Une zone de tolérance cylindrique perpendiculaire à un plan de référence dans laquelle l'axe de l'élément considéré doit se trouver.
- Une zone de tolérance définie par deux lignes parallèles, perpendiculaires à un plan ou à un axe de référence dans laquelle un élément de la surface doit se trouver.

La tolérance de perpendicularité exige toujours un élément de référence.

Selon la figure I.12, la surface tolérance doit être comprise entre 2 plans parallèles distants de 0.05 mm et perpendiculaire à la surface de référence A [2].

Figure I.12 : Tolérance de perpendicularité.

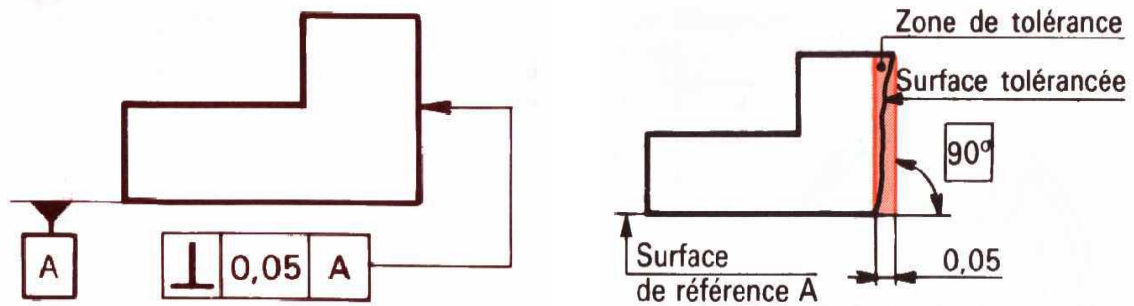


Figure I.12 : Tolérance de perpendicularité.

I.3.5.3 Inclinaison

L'inclinaison est la condition d'une surface ou d'un axe à un angle spécifié (autre que 90) par rapport à un plan ou axe de référence. La tolérance d'inclinaison indique une zone de tolérance définie par deux plans parallèles à un angle spécifié d'un plan ou axe de référence, dans laquelle :

- La surface de l'élément considéré doit se trouver.
- L'axe de l'élément considéré doit se trouver.

La tolérance d'inclinaison exige toujours un élément de référence [2].

I.4 Tolérances géométriques de battement

I.4.1 Battement simple et battement total :

Le battement est un élément de contrôle qui limite la valeur de la déviation de la forme de l'élément réel par rapport à l'élément de référence lors d'une rotation complète de l'élément autour de son axe.

Le battement simple établit la tolérance pour une section de mesure transversale d'une surface, tandis que le battement total est appliqué à la surface totale.

I.4.2 Battement circulaire

Le battement circulaire (Figure I.13) spécifie la précision de battement de toute partie d'une circonférence lorsque la pièce est mise en rotation.

Afin de respecter l'exigence de battement circulaire, la variation de la valeur mesurée lorsque la pièce est en rotation doit se trouver dans la plage spécifiée [6].

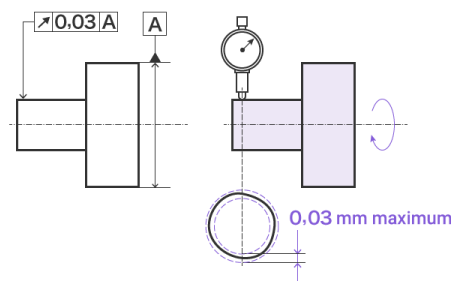


Figure I.13 : Battement circulaire [6].

I.4.3 Battement total

Le battement total spécifie la précision de battement de la totalité de la surface d'une pièce mise en rotation (Figure I.14).

Afin de respecter l'exigence de battement total, la variation de la valeur mesurée sur la totalité de la surface du cylindre doit se trouver dans la plage spécifiée (Figure I.15) [6].

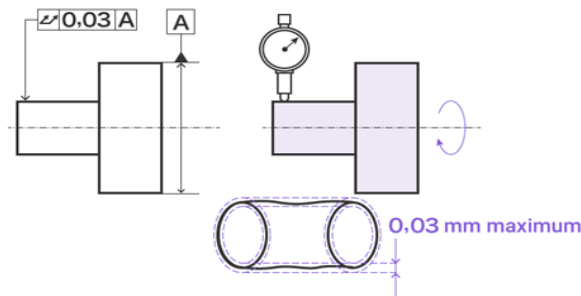


Figure I.14 Battement total [6].

| Exemple | Illustration de la tolérance | Application |
|---|--|-------------|
| Battement circulaire axial Le battement circulaire de la ligne tolérancée, lors d'une révolution complète de la pièce autour de l'axe du cylindre de référence, ne doit pas dépasser, séparément pour chaque \varnothing du cylindre de mesure, la valeur 0,05. | Pour chaque \varnothing du cylindre de mesure Course admissible 0,05 Cylindre de mesure Axe du cylindre de référence Palpeur Ligne mesurée Zone de tolérance cylindrique $0 < \varnothing \leq D$ | |
| Battement circulaire radial Le battement circulaire de la ligne tolérancée, lors d'une révolution complète de la pièce autour de l'axe du cylindre de référence A, ne doit pas dépasser, séparément pour chaque position l du plan de mesure, la valeur 0,05. | Pour chaque position l du plan de mesure Ligne mesurée Palpeur Zone de tolérance Course admissible pour le palpeur 0,05 Axe du cylindre de référence A Plan de mesure $0 < l \leq L$ | |
| Battement total axial Le battement axial de la surface tolérancée, lors des révolutions complètes de la pièce autour de l'axe du cylindre de référence, doit être compris entre 2 plans distants de 0,05 et perpendiculaire à l'axe du cylindre de référence. Pratiquement, la zone de tolérance est identique à celle d'une tolérance de perpendicularité. | Axe du cylindre de référence A 0,05 Surface tolérancée Palpeur Zone de tolérance | |
| Battement total radial Le battement radial de la surface tolérancée, lors des révolutions complètes de la pièce autour de l'axe du cylindre de référence A, doit être compris entre 2 cylindres coaxiaux distants de 0,05 dont les axes coïncident avec l'axe du cylindre de référence A. | Axe du cylindre de référence A Palpeur 0,05 Surface tolérancée Zone de tolérance | |
| Battement total dans une direction spécifiée Le battement dans la direction spécifiée de la surface tolérancée, lors des révolutions complètes de la pièce autour de l'axe du cylindre de référence, doit être compris entre 2 cônes coaxiaux distants de 0,05 dans la direction donnée et dont les axes coïncident avec l'axe du cylindre de référence. | Axe du cylindre de référence Palpeur 0,05 Surface tolérancée Zone de tolérance | |

Tableau I.3 : Différents types de Battement [5].

I.5 Zone de tolérance

Une zone de tolérance (Figure I.15) est un volume englobant une partie ou la totalité d'une surface, où l'élément théorique représente la surface (plan, axe, point) où le concepteur a toléré des erreurs quelconques. En général, plusieurs zones peuvent être imbriquées les unes dans les autres. Dans tous les cas, elles doivent se conformer aux exigences des normes et notamment :

Tolérance dimensionnelle > tolérance localisation > tolérance orientation > tolérance forme [1].

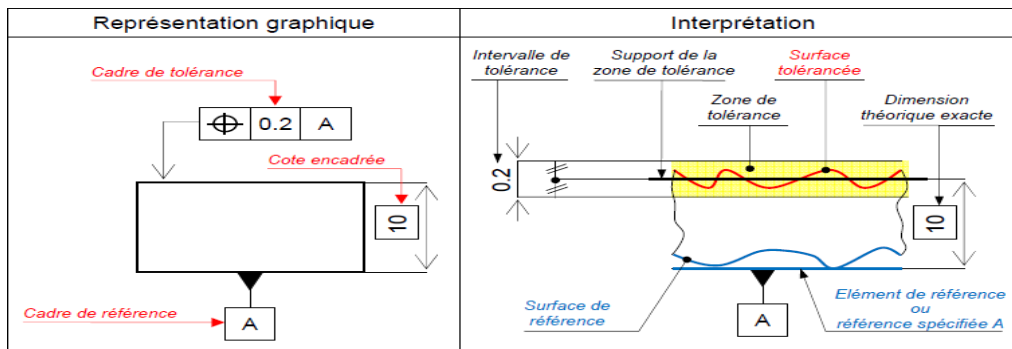


Figure I.15 : Zone de tolérance.

I.6 Analyse des tolérances

Le développement de l'industrie a acheminé la recherche, dans pratiquement tous les domaines, vers l'automatisation des processus et la mécanique ne fait pas exception, d'où le besoin d'automatiser la partie conception et contrôle, ce qui implique indubitablement l'automatisation du tolérancement. Dans cette perspective, les travaux réalisés au cours des dernières décennies s'inscrivent typiquement suivant deux axes de recherche distincts : les approches déterministes qui focalisent sur l'exactitude et les approches statistiques qui cherchent plutôt à réduire les coûts [1].

I.7 Les références

I.7.1 Les contraintes entre les références

Dans une spécification géométrique, il peut exister :

- Une référence simple liée à une seule surface.
- Une référence commune liée à plusieurs surfaces.
- Un système de références composé des précédentes.
- La référence simple.
- La référence commune.

L'association peut être faite sans contrainte par rapport à d'autres éléments géométriques. Toutefois, des contraintes d'angles et de distances entre les éléments associés constitutifs doivent être respectées, sauf indication contraire.

I.7.2 Référence simple

L'association est faite sans contrainte par rapport à d'autres éléments géométriques.

La référence est définie par un seul élément (point, droit ou plan).

La référence est identifiée par une lettre majuscule (Figure I. 16).

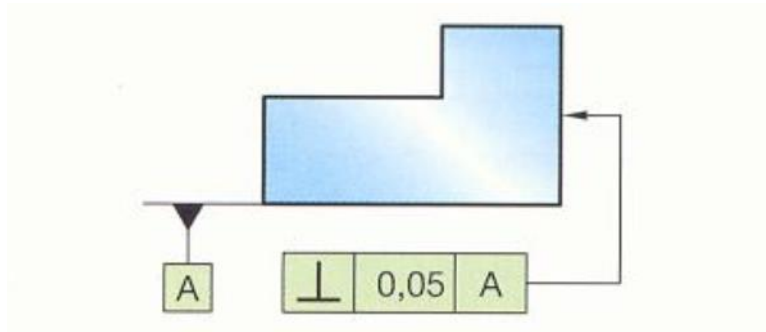


Figure I. 16 : Référence simple [5].

I.7.3 Référence commune

L'association est faite en respectant des contraintes d'angles et de distances entre les éléments associés constituants (sauf indication contraire).

La référence est identifiée par deux lettres majuscules séparées par un trait d'union.

Figure. 17 a : la référence est l'axe défini par les centres des cercles minimaux circonscrits aux sections A et B.

Figure. 17 b : la référence est l'axe défini par les deux cylindres coaxiaux et minimaux circonscrits aux éléments A et B.

Une référence commune définit un seul élément (droite ou plan) formé à partir de deux ou plusieurs références simples.

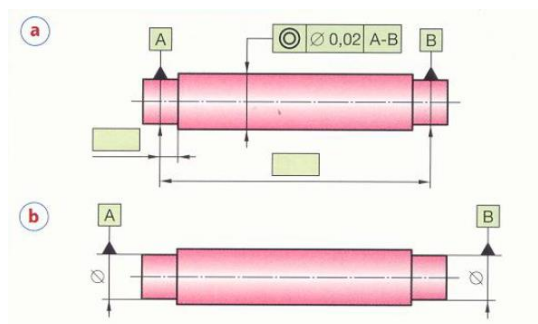


Figure I.17 : Référence commune [5].

I.7.4 Système de références spécifiées.

Un système de références (Figure I.18) est composé de plusieurs références sont identifiées de gauche à droite dans des cases séparées et dans l'ordre décroissant des degrés de liberté.

Exemple

A : élimine 3 degrés de liberté.

B : élimine 2 degrés de liberté.

C : élimine 1 degrés de liberté.

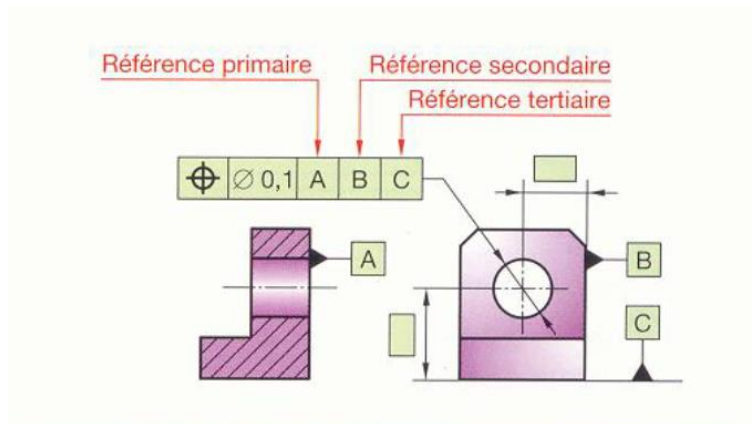


Figure I .18 : Système de références [5].

I.8 État de surface

Définition

L'état de surface d'une pièce correspond à des irrégularités de surface. Les mesures de rugosité permettent de quantifier l'état géométrique de surface de cette pièce. Les mesures de rugosité peuvent s'effectuer à l'aide d'un rugosité 2D ou 3D. Les résultats de mesures sont alors un profil (mesure 2D) ou une surface reconstruite à partir de plusieurs profils (Mesure 3D), exemple figure 19 [4].

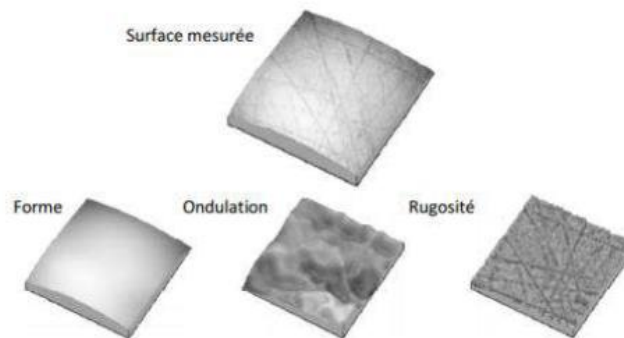


Figure I.19 : Décomposition d'une surface mesurée [4].

I.8.1 Paramètres de la rugosité

La rugosité de surface est l'ensemble des irrégularités à caractère micrographique de la surface d'une pièce usinée composée de saillies et de creux à intervalles très petits.

Rugosité R_z (Hauteur maximal du profil) : C'est la distance entre la ligne des saillies et la ligne des creux.

Rugosité R_a (Écart moyen arithmétique du profil) : Elle correspond à la moyenne des valeurs absolues des écarts entre le profil et une ligne moyenne de ce profil [4].

I.8.2 Mesure de la rugosité

Critères de rugosité (norme ISO 4287)

L'état de surface géométrique est une grandeur difficile à quantifier en toute rigueur. C'est un écart de hauteur mesuré par rapport à une référence supposée parfaite (plan, cylindre, surface complexe définie en CAO 3D.). Cet écart est variable suivant 2 directions (Pb. 2D, génératrices et directrices par exemple). Dans la pratique, compte tenu des moyens de mesure, une direction sera privilégiée (ici celle de l'avance). C'est alors sur un profil (Pb.1D) que des critères d'écart à la surface idéale (profil, rugosité, ondulation,) seront définis. La norme ISO 4287 définit les critères de base utilisés en profilométrie. Ces critères sont désignés par des codes constitués d'un préfixe en majuscule et d'un suffixe désignant la nature du critère. Le préfixe P est utilisé pour les profils bruts, R pour les profils de rugosité et W pour les profils d'ondulation.

La plupart des critères sont définis sur une longueur de base du profil, c'est-à-dire qu'ils sont estimés sur chaque longueur de base puis moyennés sur le nombre de longueurs de base choisi (par défaut ce nombre est 5) (figure20) [4].

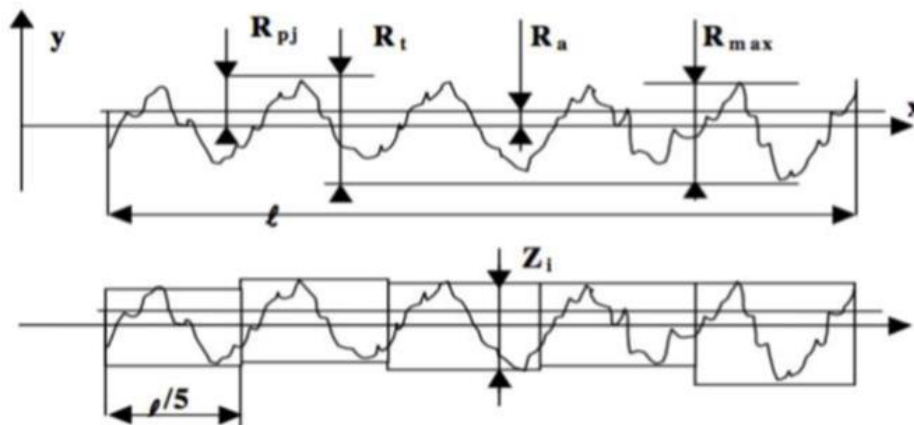


Figure I .20 : Critères de rugosité [21].

Conclusion

En conclusion, les spécifications géométriques et le tolérancement sont des outils essentiels pour garantir la qualité, la fonctionnalité et l'interchangeabilité des pièces et des assemblages mécaniques. En comprenant les principes de base du tolérancement géométrique et en appliquant des techniques de gestion des tolérances appropriées

Chapitre2

METROLOGIE DES COORDONNEES

Introduction

La métrologie des coordonnées est une discipline de la métrologie qui concerne la mesure de la géométrie de pièces ou d'objets en utilisant des systèmes de coordonnées tridimensionnels. Cette méthode de mesure est couramment utilisée dans l'industrie pour vérifier la conformité des pièces à des spécifications précises et pour assurer la qualité des produits finis.

Les systèmes de mesure des coordonnées utilisent des capteurs tels que des palpeurs, des lasers ou des scanners pour mesurer les coordonnées de points spécifiques sur la surface d'une pièce. Ces données sont ensuite traitées par des logiciels de métrologie pour générer des modèles 3D précis de la pièce mesurée.

La métrologie des coordonnées est essentielle pour garantir la qualité et la précision des pièces produites dans les industries telles que l'aérospatiale, l'automobile, la fabrication de dispositifs médicaux et l'électronique.

II.1 Machine à mesurer tridimensionnelle

II.1.1 Présentation générale des Machines à mesurer

II.1.1.1 Histoire de la machine de mesurer à coordonnées

Les premières machines de mesure à coordonnées apparurent à la moitié des années 1960. Par rapport aux standards d'aujourd'hui, ces modèles étaient construits d'une façon très simple et ne disposaient pas d'ordinateur.

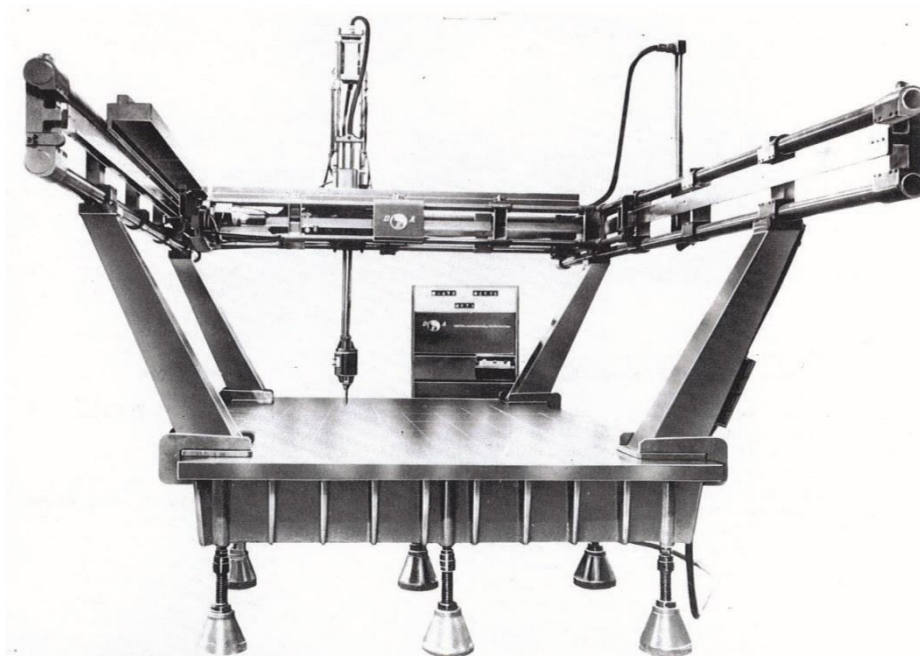


Figure II.1: Création de DEA en Italie et réalisation la même année d'Alpha, la première machine à mesurer tridimensionnelle 1963.

Bien que les machines à mesurer modernes soient beaucoup plus sophistiquées, les concepts n'ont pas changé à savoir construire une structure rigide avec trois axes de mesure perpendiculaires entre eux, monter sur chaque axe les règles puis les définir comme axes X, Y, Z.

Pour permettre le mouvement des axes, on peut faire flotter la structure sur l'air à l'aide de palier à air ou de coussinets à circuit de billes. Un dispositif de lecture permet d'enregistrer la position de la machine à tout moment. Un palpeur est monté sur l'axe vertical.

II.1.1.2 Les premiers palpeurs

La pièce à mesurer était physiquement alignée aux axes de la machine, généralement avec un indicateur à cadran monté dans la broche. On utilisait des palpeurs coniques que l'on plaçait dans le trou à mesurer, l'afficheur était ensuite programmé sur zéro et le palpeur était positionné sur l'élément suivant. Les distances dans les directions X, Y et Z étaient ensuite lues sur l'afficheur et écrites manuellement sur un rapport.



Figure II.2 : Ancien palpeur

La taille des trous était mesurée à l'aide d'un calibre et d'un micromètre ou de calibres « GO–NO GO » « ENTRE–N'ENTRE PAS ».

II.1.1.3 L'ordinateur

La pierre maitresse suivante fut l'ajout d'un ordinateur qui introduisit pour la première fois le logiciel. Les premiers logiciels utilisaient de simples algorithmes (formules) qui calculaient la distance qu'il manquait pour que la pièce soit parallèle aux axes de la machine à mesurer, ainsi l'opérateur ne devait pas aligner physiquement la pièce à la machine.

II.1.1.4 Le palpeur électronique à contact

Dans la même période, on introduisit les premiers palpeurs à commutation électronique. Le palpeur à déclenchement par contact, est inventé par Sir David McMurtry pour répondre à une demande spécifique de contrôle sur les moteurs Olympus utilisés sur l'avion Concorde. Ce produit novateur entraîne une révolution des mesures de coordonnées tridimensionnelles. L'ajout d'un palpeur électronique entraîna le besoin de nouveaux algorithmes logiciels

pour calculer les mesures en fonction des signaux envoyés par le palpeur électronique et les règles [9].

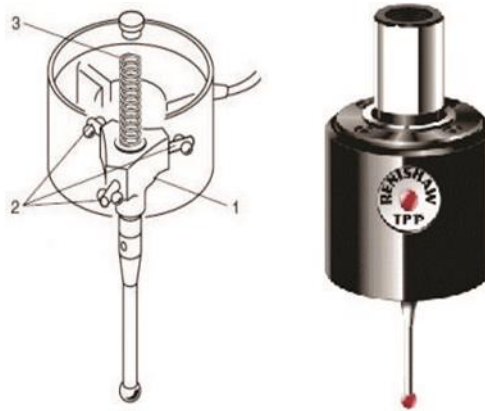


Figure II.3 : Palpeur à déclenchement par contact [9].

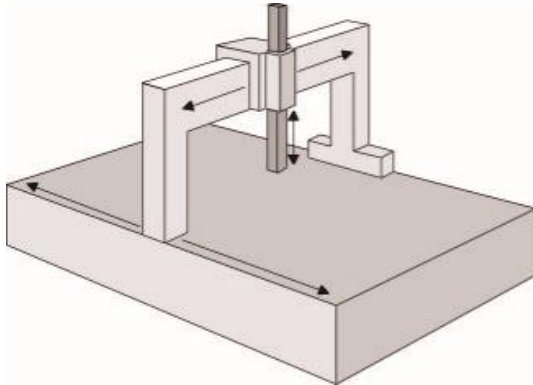
II.1.1.5 Différents modèles de MMT

Il existe différents modèles de Machines à Mesurer Tridimensionnelles (MMT) qui sont utilisés dans diverses applications industrielles. Voici une description de quelques-uns des modèles couramment rencontrés :

- MMT Portique mobile : Ce modèle de MMT se caractérise par une structure en forme de portique mobile qui permet des mouvements de translation et de rotation précis. Il offre une grande capacité de mesure pour des pièces de grandes dimensions et est utilisé dans des industries telles que l'aérospatiale et l'automobile.
- MMT Table mobile : Ce modèle de MMT est équipé d'une table de mesure mobile, permettant de déplacer les pièces à mesurer avec précision sous la sonde de mesure. Il offre une grande flexibilité et est utilisé pour la mesure de pièces de taille moyenne à grande.
- MMT Col de Cygne : Ce modèle de MMT se distingue par sa structure en forme de col de cygne, qui permet d'accéder facilement à des zones difficiles à atteindre sur les pièces à mesurer. Il est souvent utilisé pour la mesure de pièces complexes dans l'industrie mécanique.
- MMT Cantilever : Ce modèle de MMT se compose d'un bras horizontal fixé à une colonne verticale. Il offre une grande stabilité et est utilisé pour des mesures précises et répétables sur des pièces de taille moyenne.
- MMT Bras horizontal : Ce modèle de MMT est équipé d'un bras horizontal qui peut se déplacer sur différents axes. Il permet des mesures précises sur des pièces de formes complexes et est utilisé dans des industries telles que l'électronique et la fabrication de moules.
- MMT Double bras horizontal : Ce modèle de MMT est similaire au bras horizontal, mais il est équipé de deux bras parallèles qui peuvent travailler simultanément pour des mesures encore plus rapides et précises. Il est utilisé pour des applications nécessitant une haute productivité et une précision élevée.

Chapitre II : METROLOGIE DES COORDONNEES

Chaque modèle de MMT présente des caractéristiques spécifiques qui les rendent adaptés à différentes applications et industries. Le choix du modèle dépend des exigences de mesure, de la taille et de la complexité des pièces à mesurer, ainsi que des besoins spécifiques de l'industrie.



Portique mobile

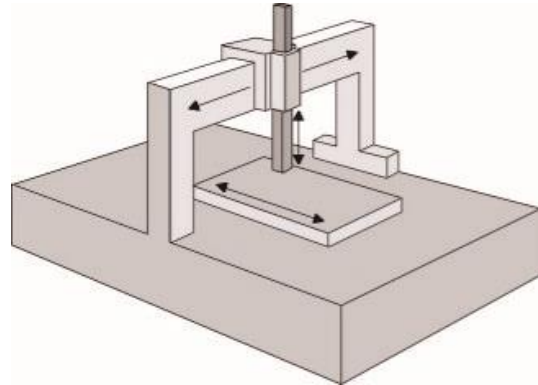
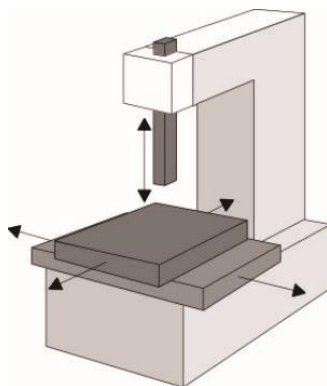
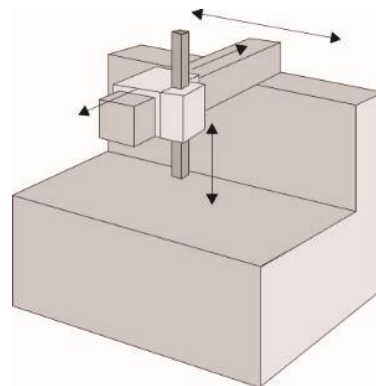


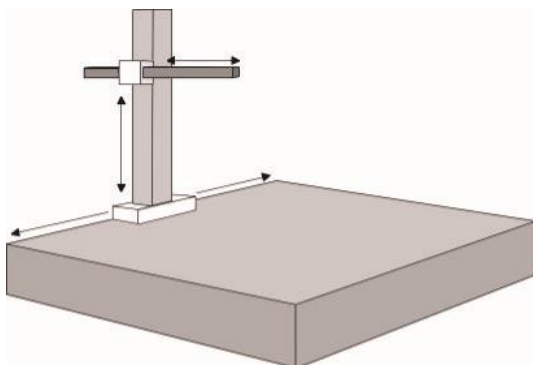
Table mobile



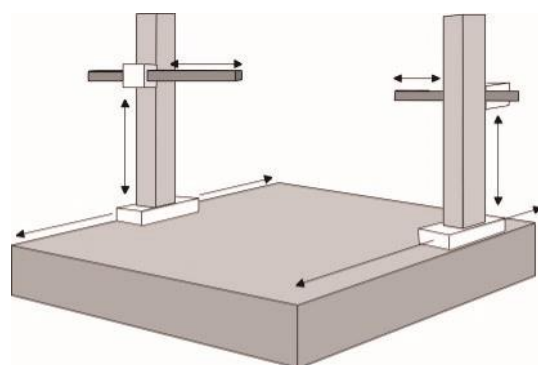
Cole de Cygne



Cantilever



Bras horizontal



Double bras horizontal

Figure II.4 : Différents modèles de MMT [9].

II.1.2 Principaux composants de la MMT

La machine de mesure tridimensionnelle (MMT) est composée de plusieurs éléments clés qui travaillent ensemble pour mesurer avec précision les dimensions et les formes des pièces. Les principaux composants d'une MMT sont les suivants :

1. **La table de mesure** : c'est la surface sur laquelle la pièce est placée pour la mesure. La table de mesure est généralement en granit pour sa stabilité thermique et sa résistance à la flexion.
2. **Le bras de mesure** : c'est l'élément mobile de la MMT qui transporte le palpeur de mesure jusqu'à la pièce pour prendre des mesures. Le bras de mesure peut être de type fixe, manuel ou motorisé, et il est généralement équipé d'un système de palpeur pour mesurer les dimensions.
3. **Le palpeur de mesure** : c'est l'élément qui touche la surface de la pièce et enregistre les dimensions. Il existe différents types de palpeurs de mesure, tels que les palpeurs à contact, les palpeurs à laser, les palpeurs optiques et les palpeurs à balayage.
4. **Les systèmes d'entraînement** : ce sont les éléments qui permettent le mouvement de la table de mesure et du bras de mesure pour atteindre les différentes positions de la pièce.
5. **Les capteurs de mesure** : ce sont les éléments qui transforment les mouvements du bras de mesure et les dimensions mesurées en signaux électroniques, qui sont ensuite traités pour afficher les résultats de la mesure.
6. **Le logiciel de mesure** : c'est le système informatique qui contrôle la MMT et traite les données de mesure pour afficher les résultats. Les logiciels de mesure modernes permettent également l'analyse de données, la gestion de données de mesure et la programmation automatique de la MMT.

En somme, les MMT sont des instruments sophistiqués qui combinent plusieurs éléments clés pour mesurer avec précision les dimensions et les formes des pièces.

Comme le montrent les figures suivantes (figure II.5) et (figure II.6).

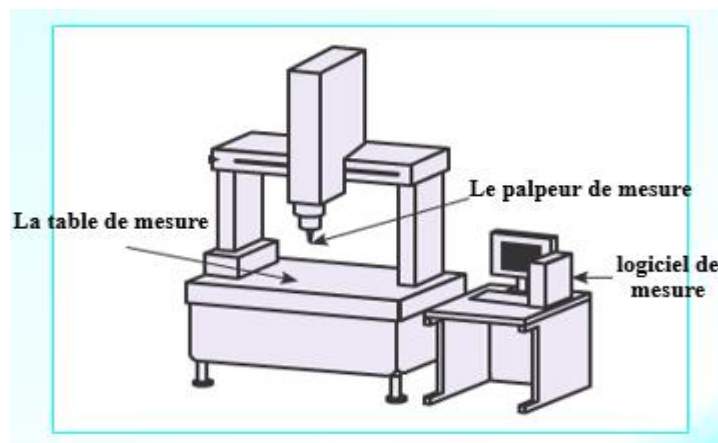


Figure II.5 : machine de mesure de coordonnées (mmt) [25].

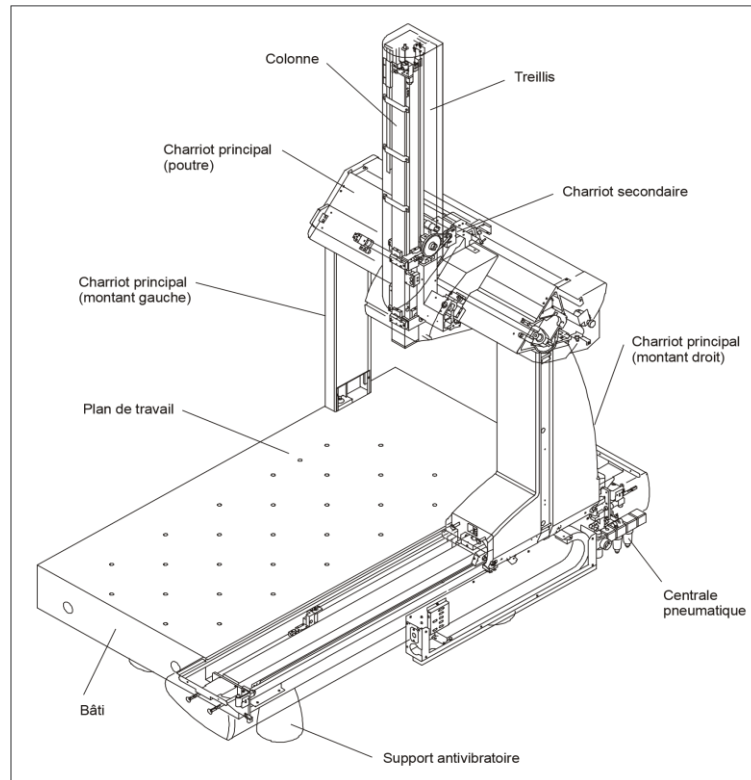


Figure II.6 : Composants de la machine à mesurer [10].

II.1.3 Programmation de la MMT

Les techniques suivantes sont utilisées pour entraîner la tête de sonde CMM afin de mesurer la surface de la pièce :

II.1.3.1 Programmation manuel

Cela se fait en contrôlant la tête de sonde de la machine pour toucher la pièce aux points spécifiés. Les codeurs déterminent alors les emplacements des points sondés dans l'espace cartésien.

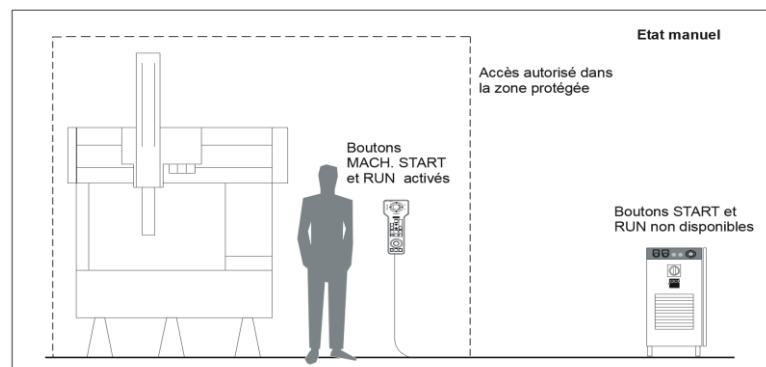


Figure II.7 : programmation manuel.

II.1.3.2 Programmation automatique

Le plan et le programme d'inspection de la MMT sont générés automatiquement en fonction des données CAO et de l'expérience codée du planificateur de MMT. Des calculs sophistiqués sont inclus, par exemple, l'attribution des points d'inspection, le regroupement des points, la planification de l'orientation des sondes et la planification optimale de la trajectoire de la sonde sans collision [11].

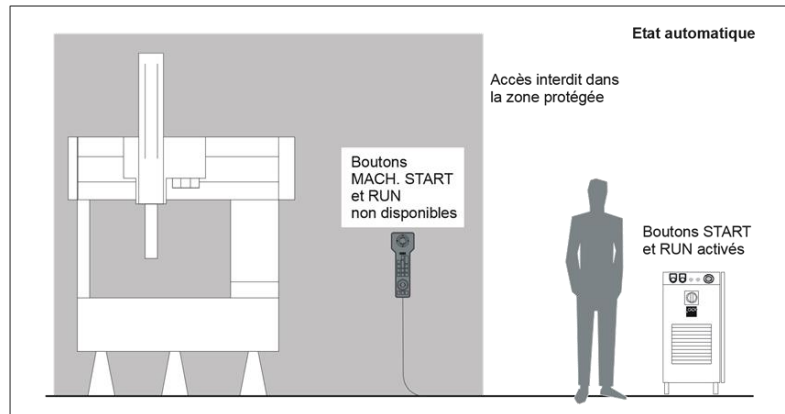


Figure II.8 : programmation automatique.

II.1.4 Incertitude de mesure de la MMT

L'incertitude de mesure d'une Machine à Mesurer Tridimensionnelle (MMT) est une estimation quantitative de la variabilité ou de l'erreur potentielle associée à une mesure effectuée par la MMT. Elle indique la confiance ou la précision avec laquelle une mesure peut être considérée comme représentative de la grandeur réelle de la pièce.

L'incertitude de mesure est influencée par plusieurs facteurs, notamment :

- Les caractéristiques de la MMT : La précision, la résolution et la stabilité de la MMT elle-même jouent un rôle crucial dans l'incertitude de mesure. Les MMT de haute précision avec des capteurs de haute résolution réduisent généralement l'incertitude de mesure.
- Les conditions environnementales : Les variations de température, d'humidité, de vibrations et d'autres facteurs environnementaux peuvent avoir un impact sur les mesures de la MMT. Les MMT doivent être installées dans des environnements contrôlés pour minimiser ces effets et réduire l'incertitude de mesure.
- Les caractéristiques de la pièce à mesurer : La complexité géométrique, la rugosité de surface, la taille de la pièce et d'autres facteurs intrinsèques de la pièce peuvent influencer l'incertitude de mesure. Des pièces plus complexes ou de plus petite taille peuvent présenter une incertitude de mesure plus élevée.
- Les méthodes de mesure utilisées : Les méthodes de programmation, de fixation de la pièce, de choix des points de mesure et d'autres paramètres de mesure peuvent affecter l'incertitude de mesure. Une méthode de mesure bien optimisée et validée peut réduire l'incertitude [24].

Pour estimer l'incertitude de mesure, des méthodes statistiques et des calculs d'erreur sont souvent utilisés. Ces méthodes prennent en compte les différentes sources d'incertitude et permettent d'estimer une valeur numérique qui représente la confiance dans la mesure effectuée.

Il est important de noter que l'incertitude de mesure ne peut jamais être complètement éliminée, mais elle peut être minimisée en utilisant des techniques appropriées, en calibrant régulièrement la MMT et en respectant les bonnes pratiques de mesure.

L'incertitude est positionnée par rapport à la valeur mesurée et est généralement centrée symétriquement, comme l'illustre la figure.

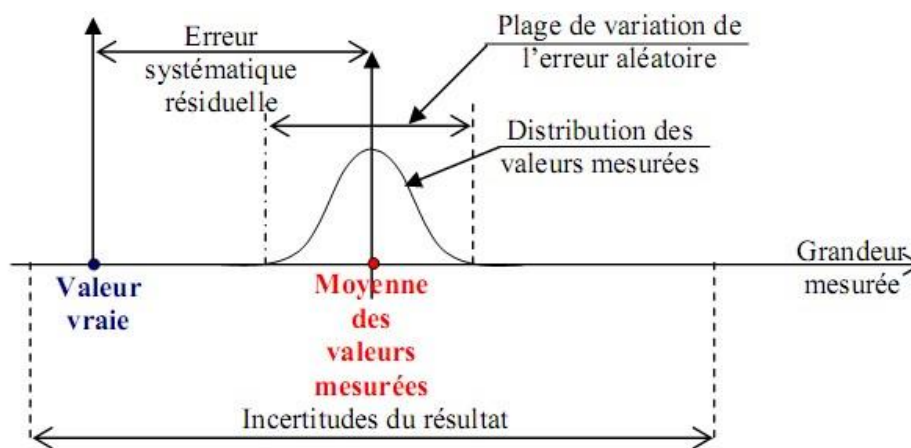


Figure II.9 : Les concepts de base de la métrologie [11].

II. 1.5 Aperçu de la planification de l'inspection

II.1.5.1 Processus d'inspection

Ce procédé consiste à déterminer la stratégie de mesures, par exemple, la mesure de position d'un cylindre par rapport à une référence. Dans ce processus, toutes les caractéristiques connexes nécessaires pour produire le résultat des mesures dimensionnelles et géométriques doivent être correctement définies.

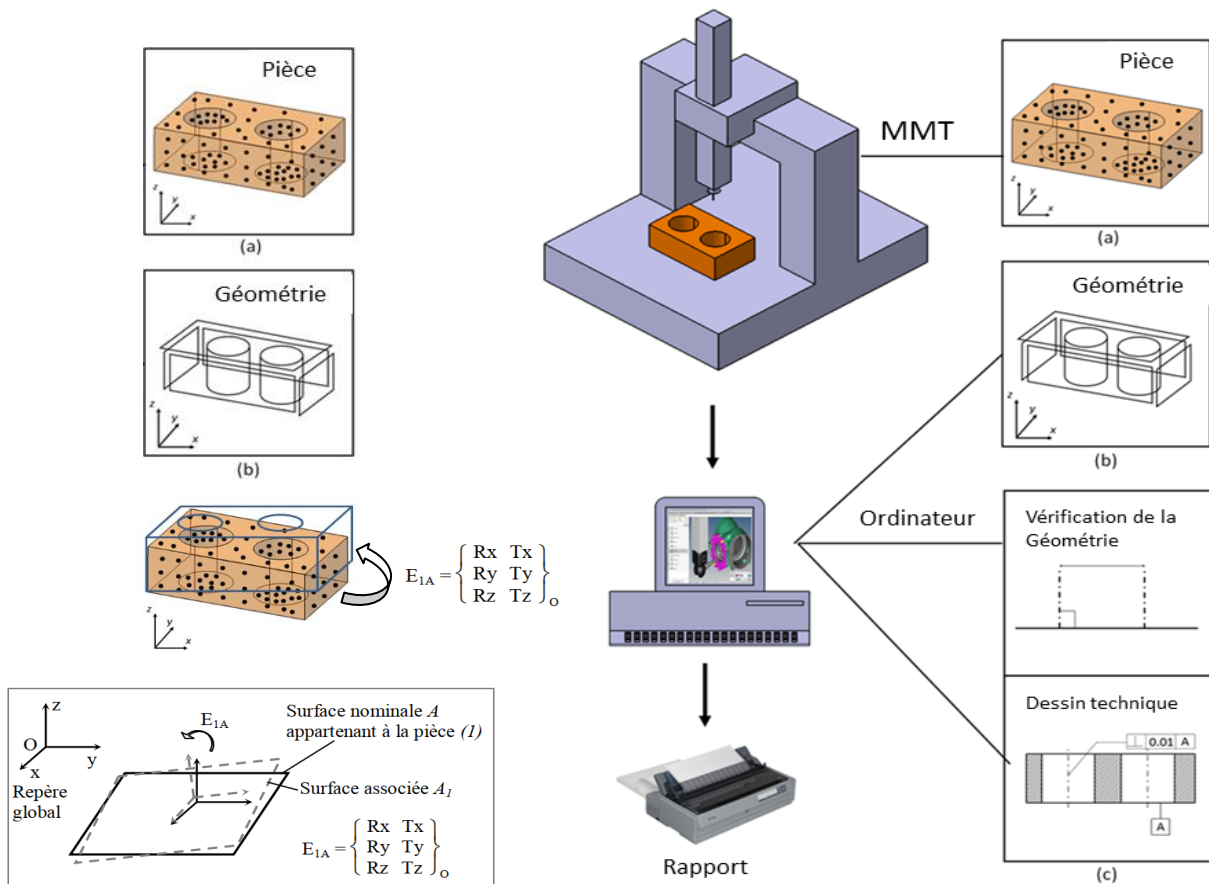


Figure II.10 : Processus d'inspection [12].

II.2 Automatisation de la programmation M.M.T

L'automatisation de la programmation des Machines à Mesurer Tridimensionnelles (MMT) est un domaine en pleine expansion qui vise à simplifier et à accélérer le processus de programmation des MMT. Traditionnellement, la programmation d'une MMT nécessitait une expertise approfondie et une connaissance des logiciels spécifiques utilisés par chaque fabricant. Cependant, avec les avancées technologiques, il est maintenant possible d'automatiser une grande partie de ce processus.

L'automatisation de la programmation des MMT présente de nombreux avantages. Tout d'abord, elle permet de réduire considérablement le temps et les ressources nécessaires pour programmer une MMT. Les opérateurs peuvent utiliser des interfaces conviviales et des logiciels intuitifs pour définir les paramètres de mesure, sélectionner les points de mesure, spécifier les trajectoires et générer automatiquement le programme de mesure.

En outre, l'automatisation de la programmation des MMT contribue à minimiser les erreurs humaines potentielles. En utilisant des algorithmes avancés, les logiciels d'automatisation peuvent analyser les modèles géométriques des pièces, déterminer les trajectoires de mesure optimales et ajuster automatiquement les paramètres de mesure en fonction des caractéristiques spécifiques de la pièce.

Chapitre II : METROLOGIE DES COORDONNEES

Cette automatisation permet également de standardiser les procédures de programmation et de garantir une cohérence et une reproductibilité accrues des mesures. Les programmes de mesure automatisés peuvent être enregistrés et réutilisés pour des pièces similaires, ce qui permet de gagner du temps et de garantir une qualité constante des mesures.

Enfin, l'automatisation de la programmation des MMT facilite l'intégration avec d'autres systèmes de production, tels que les machines-outils ou les robots. Les données de mesure peuvent être transmises automatiquement à d'autres processus, ce qui permet une meilleure intégration de la MMT dans les chaînes de production et une amélioration de l'efficacité globale.

Cependant, il est important de noter que l'automatisation de la programmation des MMT ne remplace pas complètement l'expertise humaine. Les opérateurs doivent toujours avoir une compréhension des principes de mesure et des spécificités des pièces à mesurer. Ils jouent un rôle essentiel dans la validation des programmes de mesure automatisés et dans l'interprétation des résultats obtenus.

[10].



Figure II.11 : générer automatiquement le programme de mesure [13].

II.2.1 Orientation des pièces

Chaque plan d'inspection doit inclure l'orientation ou les orientations des pièces associées, le type et/ou l'angle de la sonde de la Machine à Mesurer Tridimensionnelle (MMT) et la liste des points de mesure pour chaque combinaison d'orientation/angle de sonde. Dans de nombreux cas, les systèmes d'inspection commencent par la localisation de la pièce, où le programme détermine mathématiquement comment la pièce a été positionnée sur la table de la MMT. Le programme d'inspection est ensuite élaboré en utilisant cette information comme point de départ, plutôt que de chercher d'abord à déterminer une orientation "optimale" de la pièce pour l'inspection. En cherchant à optimiser la procédure d'inspection en minimisant les réorientations des pièces et les changements d'angle de la sonde de la MMT, et donc en réduisant le temps d'inspection, on peut aisément comprendre l'importance de la décision d'orientation de la pièce lors de l'inspection.

L'orientation des pièces est une considération primordiale pour l'inspection ainsi que pour d'autres procédés de fabrication tels que l'usinage à commande numérique (CN) et les applications robotiques telles que l'assemblage, le soudage et la peinture. Par exemple, lors de l'inspection par MMT d'une pièce, une orientation spécifique peut permettre d'inspecter toutes les caractéristiques souhaitées de la pièce en une seule configuration. En revanche, d'autres orientations peuvent nécessiter une manipulation supplémentaire. Cependant, la question de l'automatisation de l'orientation des pièces, c'est-à-dire la décision de la relation spatiale entre la pièce et la MMT, n'a pas reçu une attention explicite considérable. En général, il semble que cette décision soit encore prise manuellement.

L'automatisation de cette fonction de décision aurait un impact substantiel sur la planification des processus de fabrication en général, en évitant la réorientation et/ou la refixation de la pièce afin de rendre toutes les caractéristiques souhaitées accessibles à la sonde CMM. L'orientation des pièces est donc essentielle pour exploiter pleinement les capacités de la machine. Bien que l'importance de cette question ait été reconnue à maintes reprises dans la littérature, il n'y a pas eu beaucoup de travaux publiés dans ce domaine. De nombreux travaux ont été signalés ces dernières années dans le domaine de l'inspection automatisée [14].

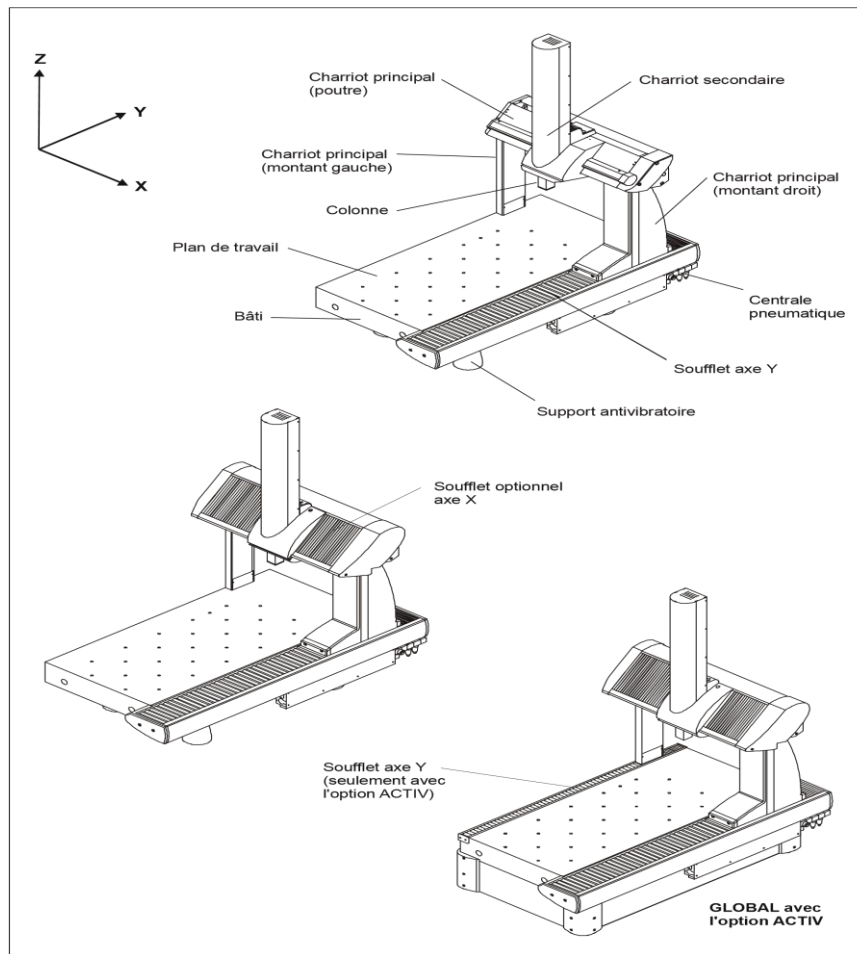


Figure II.12 : La machine à mesurer GLOBAL [10].

II.2.2 Inspection visuelle

L'automatisation de la décision d'orientation des pièces a été abordée brièvement dans la littérature, principalement dans le contexte des applications d'inspection visuelle.

Récemment, de nombreuses recherches ont été réalisées dans le domaine de l'intégration des systèmes de CAO et de vision. Plusieurs travaux ont été réalisés pour développer une interface entre le système de vision et la base de données CAO, permettant ainsi d'effectuer des tâches d'inspection. Dans un système d'inspection basé sur la vision, une caméra agit comme un dispositif de détection plutôt que comme un capteur tactile ou une sonde. Les caractéristiques qui apparaissent dans la vue de la caméra dépendent de l'orientation de la pièce.

L'orientation optimale de la pièce est recherchée afin d'optimiser le nombre de caractéristiques visibles dans la vue de la caméra. Des recherches réalisées par Majumdar et al. ont intégré un système de CAO à un système de vision industrielle pour automatiser la tâche d'inspection des pièces. Leur schéma identifie les entités primitives à partir des données CAO, génère un ensemble de paramètres à mesurer pour inspecter chaque entité, calcule

toutes les orientations stables (poses) possibles de la pièce ainsi qu'un groupe d'entités visibles dans chaque orientation, puis sélectionne les vues à inspecter. Les vues à inspecter sont choisies parmi l'ensemble des vues générées en prenant en compte la visibilité et la mesurabilité d'un paramètre. Le plan d'inspection final spécifie un ensemble d'orientations optimales et une liste de paramètres à mesurer pour chacune d'entre elles. Les caractéristiques primitives considérées dans cette étude se limitent aux fentes de différents types, telles que rectangulaires, en forme de V, pentagonales, hexagonales, etc. [14].

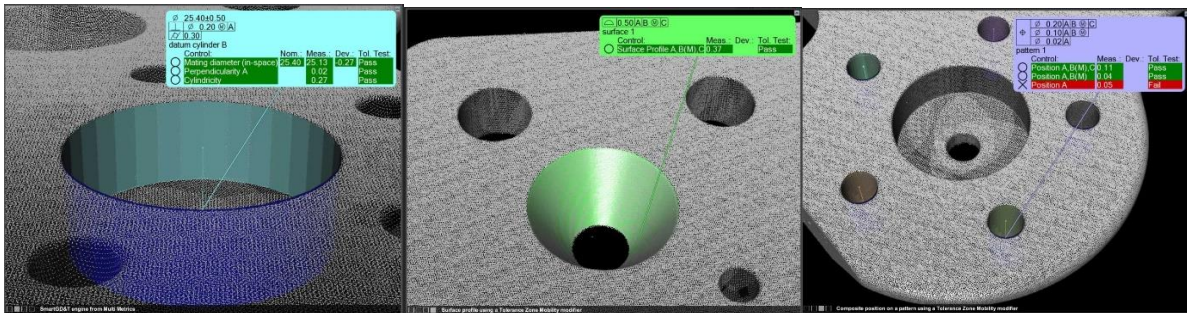


Figure II.13 : Inspection visuelle [15].

II.3 Accessibilité

II.3.1 Accessibilité des fonctionnalités pour l'inspection

L'analyse de l'accessibilité joue un rôle important dans la planification de l'inspection dimensionnelle des pièces mécaniques par les MMT ou par les systèmes de vision.

L'orientation d'une sonde MMT ou l'emplacement d'un capteur de vision par rapport à une pièce dépend essentiellement de l'accessibilité et de la visibilité des caractéristiques de surface.

La question de l'accessibilité sous-tend la tâche de planification de l'inspection automatisée des pièces. Des travaux récents ont été publiés qui tentent de déterminer l'orientation/l'angle optimal de la sonde CMM pour une accessibilité maximale des fonctionnalités.

Spyridi et Requicha [19] ont présenté un algorithme visant à analyser l'accessibilité de la face englobante d'un solide. Dans leur étude, ils caractérisent de manière quantitative l'accessibilité à l'aide d'un ensemble de directions appelé cônes d'accessibilité. Ils subdivisent le concept de cône d'accessibilité en un cône d'accessibilité local (LAC) et un cône d'accessibilité global (CAG) afin de déterminer les limites des angles de sondage réalisables, garantissant ainsi l'accessibilité de toutes les caractéristiques. En considérant un solide et un ensemble de caractéristiques de surface à inspecter, Spyridi et Requicha recherchent un ensemble minimal d'angles de sondage (ou de sondes) permettant à chaque caractéristique d'être inspectée par au moins une sonde de cet ensemble.

Ils résolvent ce problème en deux étapes : (1) l'analyse de l'accessibilité, qui détermine les cônes de directions accessibles pour les caractéristiques, et (2) le regroupement, qui sélectionne l'ensemble minimal de directions, c'est-à-dire les angles de sondage suffisants pour inspecter toutes les caractéristiques. Leur analyse se limite aux surfaces planes et quadriques.

Yau et Menq ont présenté une extension de l'analyse de Spyridi et Requicha en calculant des cônes d'accessibilité pour des surfaces sculptées de forme libre.

Aucun algorithme exact n'est connu pour déterminer les cônes d'accessibilité locaux (LAC) tels que définis par Spyridi et Requicha pour les surfaces de forme libre. Cependant, d'un point de vue pratique, le LAC exact d'une surface n'est pas nécessaire pour déterminer l'angle de la sonde. Yau et Menq proposent une méthode pour déterminer le LAC en fonction des points de mesure souhaités uniquement, plutôt que de la surface entière.

Étant donné que la MMT ne prend que des points d'inspection discrets, les collisions ne sont préoccupantes qu'aux points où la sonde prévoit entrer en contact.

Lim et Menq [20] proposent une méthode de calcul visant à résoudre le problème du calcul du GAC tel que défini par Spyridi et Requicha. Leur objectif est de déterminer toutes les orientations possibles de la sonde pour inspecter une pièce en utilisant une sonde à déclenchement tactile. Ils simplifient l'algorithme présenté par Spyridi et Requicha dans trois domaines : la sonde tactile, le chemin de fonctionnalité et le cône d'accessibilité.

Pour simplifier la sonde tactile, ils supposent que le stylet de la sonde est une ligne s'étendant du point d'inspection à l'infini. Cela signifie que la pointe de la sonde et le stylet sont considérés comme ayant des diamètres négligeables. En simplifiant les caractéristiques, ils assouplissent l'hypothèse selon laquelle le BAC (Boîte englobante convexe) et le CAG (Caractéristique d'accessibilité globale) reposent sur l'ensemble des caractéristiques.

Étant donné que seuls les points d'inspection du MMT (Machine de Mesure Tridimensionnelle) sont importants, chaque point est pris en compte pour l'accessibilité plutôt que l'ensemble des caractéristiques. Enfin, le cône d'accessibilité est simplifié en une carte d'accessibilité en éliminant certaines informations inutiles. L'unique information pertinente lorsque la sonde est en contact avec le point d'inspection est l'orientation de la sonde. Les autres informations, telles que la distance de collision, ne sont pas pertinentes et sont donc éliminées.

Khoshnevis et Yeh [26] ont développé une méthode bidimensionnelle pour déterminer la plus grande zone d'accessibilité associée à une partie d'une caractéristique.

Encore une fois, une méthode d'abstraction de sonde est utilisée, mais pour une sonde de déclenchement de type déviation indexable. La zone d'accessibilité d'un segment de limite est définie comme l'ensemble de toutes les orientations de sonde réalisables qui permettent un contact sans collision avec les points du segment.

La plus grande taille de zone possible est de 180 degrés, où la sonde peut atteindre les points d'un segment dans le demi-espace.

L'objectif de la méthodologie est de trouver l'accessibilité de chaque surface. Des contours ou des tranches bidimensionnelles sont générés à partir des modèles solides tridimensionnels, et les arêtes 2D sont analysées pour l'accessibilité par la sonde.

Des règles heuristiques basées sur la géométrie de surface sont utilisées pour identifier les surfaces accessibles et mesurables sur les objets, ainsi que la position et l'orientation de la sonde pour chaque point de mesure.

II.3.2 Sens d'approche de l'outil

Direction de l'approche de l'outil Un domaine de recherche connexe est le travail effectué pour déterminer les directions d'approche d'outil réalisables pour l'usinage d'une caractéristique.

La direction d'approche de l'outil est la direction à partir de laquelle une fonction peut être approchée pour l'usinage sans interférence d'autres parties de la pièce.

Il est utilisé pour détecter la faisabilité de l'usinage de la pièce, déterminer l'orientation de l'outil et la fixation de la pièce.

Le problème de la détermination de la direction d'approche de l'outil est similaire au problème d'accessibilité des caractéristiques mentionné précédemment en ce sens que l'outil et la sonde doivent entrer en contact avec la pièce à un certain endroit sans toucher aucune autre partie de la pièce.

De même, les informations globales et locales doivent être prises en compte dans l'analyse. Une méthode pour résoudre le problème de direction d'approche de l'outil est présentée par Joshi et Chang.

Leur approche suggère d'obtenir d'abord toutes les directions d'approche d'outil possibles / localement réalisables pour chaque caractéristique, puis de vérifier le long de ces directions les faces de la pièce qui obstrueraient le mouvement de l'outil.

Su et Mukerjee [14] ont abordé le même problème uniquement pour les machines à commande numérique à trois axes. Dans leur méthode, la pièce est placée dans un cadre de sélection et la projection orthogonale de chaque surface de la pièce est projetée sur chaque face du cadre de sélection.

Une surface de pièce est considérée comme usinable si elle peut être construite en utilisant une combinaison de projections.

Tseng et Joshi [14] discutent de l'usinage 3 axes avec une fraise à billes pour générer des courbes de Bézier et des surfaces de Bézier. Ils présentent des algorithmes basés sur la subdivision du polygone de contrôle pour déterminer les directions d'approche de l'outil réalisables, qui peuvent ensuite être utilisées pour répondre aux questions suivantes : (1) La courbe / surface donnée est-elle usinable avec une machine à 3 axes et (2) quelle devrait être l'orientation de la pièce pour que la courbe / les surfaces soient présentées dans une direction appropriée par rapport à l'outil de coupe pour la fixation et l'usinage ? Une analyse connexe est présentée par Haghpassand et Oliver [14]. Leur travail présente une méthode pour trouver l'orientation optimale de la pièce par rapport à un outil de fraisage pour l'usinage.

L'orientation idéale d'une pièce par rapport à un tel outil est celle dans laquelle l'axe de l'outil est aligné avec les normales de la surface. Il en résulte les plus grandes régions usinées pour une taille d'outil donnée, réduisant ainsi le temps de fraisage, la finition manuelle, etc. De toute évidence, cette orientation idéale de l'outil n'est pas possible en tout point de la surface puisque l'orientation de l'outil est limitée à certains angles.

La méthode de Haghpassand et Oliver trouve l'orientation de la pièce qui minimise l'angle entre les normales de surface de conception et l'axe de l'outil de fraisage. Cette technique détermine d'abord si la pièce peut être fraisée complètement dans une seule configuration sur un usinage de fraisage à trois axes. Ceci est fait en conjonction avec la recherche du coin minimum nécessaire pour couvrir un polygone convexe sphérique. Le système nécessite un modèle géométrique complet de la pièce.

II.4 Détermination des points de mesure

Une fois que les problèmes d'orientation des pièces et d'accessibilité des caractéristiques ont été résolus, la tâche suivante du processus d'inspection est la planification de la trajectoire de la sonde CMM.

Afin de planifier complètement la trajectoire réelle de la sonde, les points de mesure spécifiques associés à chaque caractéristique doivent être connus.

En général, une MMT acquiert les données d'inspection point par point. Ces points de données doivent être analysés afin de créer un modèle géométrique de l'entité mesurée, souvent appelé géométrie de substitution, à des fins de comparaison avec l'intention de conception. Cette analyse est effectuée à l'aide d'algorithmes dont les résultats dépendent fortement de plusieurs facteurs, dont la méthode d'échantillonnage et la densité d'échantillonnage.

La détermination des points de mesure pour le contrôle dimensionnel d'une pièce par une MMT est un problème intéressant. L'un des problèmes est que la quantité d'échantillonnage ponctuel effectuée est fonction des contraintes économiques dues au coût du temps de mesure et de la performance de calcul.

De plus, il est possible que le processus de fabrication produise des erreurs systématiques qu'une stratégie d'échantillonnage devrait être en mesure de détecter. Par conséquent, un nombre d'échantillons recommandé fondé sur des statistiques est nécessaire, ainsi qu'un schéma de distribution de l'échantillonnage.

Enfin, les objectifs du processus d'échantillonnage ponctuel peuvent différer selon l'algorithme géométrique utilisé pour évaluer l'entité. Un algorithme peut donner un résultat d'inspection différent en fonction de l'échantillon ponctuel fourni. Par conséquent, la détermination des points de mesure peut être influencée d'une manière ou d'une autre par le choix de l'algorithme d'évaluation. Par conséquent, il est important de réaliser que la technique d'inspection joue un rôle influent dans le résultat final mesuré.

Théoriquement, il y a un nombre minimal de points requis pour déterminer les entités géométriques. Cependant, des points supplémentaires sont nécessaires pour obtenir des informations concises et statistiquement fiables sur le véritable écart de l'objet par rapport au nominal.

Le nombre de points de mesure requis pour obtenir une assurance de la qualité efficace est inconnu, et sa détermination reste largement ignorée. C'est un problème assez compliqué, en particulier pour la mesure des surfaces sculptées.

Le nombre de points de mesure requis a des implications importantes sur la vitesse d'inspection et l'analyse comparative.

D'un point de vue pratique, l'objectif est de déterminer un plan d'inspection qui nécessite le moins de mesures possible pour fournir suffisamment d'informations sur l'assurance de la qualité.

Certains travaux ont été effectués dans le domaine général de la détermination du nombre de points d'échantillonnage nécessaires pour accomplir certaines tâches [14]. Utilisent une analyse statistique pour établir l'emplacement des plans et des cercles à l'aide d'une sonde tactile. Ils tentent de déterminer le nombre minimum de points de mesure requis et leur emplacement afin de localiser une entité dans un intervalle de confiance spécifié. Ils utilisent une analyse de régression linéaire pour déterminer l'emplacement des plans, en tenant compte de deux termes d'erreur : (1) erreur aléatoire due aux imperfections de surface et (2) erreur de mesure. Les auteurs supposent une borne sur l'intervalle de confiance de la mesure. Ils montrent que le nombre et l'emplacement des points peuvent être déterminés pour satisfaire à cette limite si les écarts d'erreur sont connus [18]

Analysent le nombre de points de sonde nécessaires pour estimer la circularité d'une caractéristique. Lors de la mesure de cercles, les auteurs utilisent d'abord trois points pour définir le centre approximatif, puis prennent des mesures supplémentaires du point de sonde à intervalle angulaire régulier espacés pour trouver la zone minimale pour une analyse min-max.

Le nombre de points d'échantillonnage requis pour évaluer la rectitude et la rondeur par rapport aux appareils de mesure de la vision a été étudié par Chang et al [17]. Leur étude suggère que la précision des estimations augmente à mesure que la taille de l'échantillon ponctuel augmente, mais que l'efficacité marginale diminue.

Ils affirment également que des échantillons supplémentaires peuvent effectivement réduire la précision de mesure dans certains cas, ce qui semble contradictoire avec les concepts de la théorie conventionnelle de l'échantillonnage.

Menq et al. [29]. Commencent leur approche de ce problème par une analyse statistique pour déterminer le nombre de points de mesure pour un profil de surface en fonction de la spécification de tolérance et de la capacité du processus de fabrication. Leur analyse est conçue pour démontrer deux questions importantes dans la planification de l'inspection dimensionnelle : (1) le nombre requis de points de mesure ne devrait pas dépendre uniquement des spécifications de conception, mais aussi de divers facteurs de conception et de fabrication, et (2) les spécifications de conception et les informations de fabrication peuvent être combinées pour déterminer la stratégie d'inspection souhaitée à l'aide d'une analyse statistique. Enfin, le projet DITS, Dimensionnel Inspection Techniques Spécification, a été lancé en 1991 dans le but de déterminer les techniques de mesure.

Il s'agit d'un projet en plusieurs phases où chaque phase vise à accomplir plusieurs tâches, y compris l'identification des paramètres affectant les résultats de mesure et la détermination des meilleures stratégies de mesure. L'objectif de ce projet est d'examiner de manière plus détaillée et méthodique les tentatives de normalisation des techniques de mesure.

II.5 Planification de la trajectoire pour l'inspection MMT

La planification des trajectoires est généralement la tâche finale du processus de planification de l'inspection du CGM.

Négligeant la détection des collisions, le problème de planification de trajectoire est simplement de savoir comment se déplacer d'un point d'inspection à un autre avec les contraintes de parcourir l'ensemble en un minimum de temps.

C'est le problème bien défini du vendeur itinérant. La détection des collisions est cependant extrêmement importante et l'objectif est d'automatiser la planification d'un chemin d'inspection sans collision.

En général, l'objectif est de réduire au minimum la distance totale parcourue par la sonde CMM pendant l'inspection, contribuant ainsi à minimiser le temps total d'inspection.

Le problème de la planification d'un chemin sans collision devient plus difficile pour les pièces ayant une géométrie complexe.

Le problème de planification de trajectoire de MMT est similaire à de nombreux problèmes de planification de trajectoire de robot.

De nombreuses recherches ont été consacrées au domaine de la planification de trajectoires sans collision pour les robots manipulateurs dans un environnement connu.

Une approche populaire de ce problème est la méthode de l'espace de configuration (espace C), où les obstacles sont modélisés comme de simples polyèdres pour permettre la détection facile des collisions entre les obstacles et le robot.

Pour la planification de trajectoire entre une position de départ et une position d'objectif, la méthode recherche dans l'espace libre (c'est-à-dire le complément de l'espace de collision) une trajectoire sans collision à l'aide de l'algorithme A*. Merat et Radack utilisent un algorithme d'évitement de collision similaire, tel que décrit par Lozano-Perez et Wesley, pour déterminer un chemin sans collision consistant en une série de mouvements en ligne droite dans le cadre de leur système automatisé de planification d'inspection.

Malheureusement, lorsqu'elle est appliquée à l'inspection par MMT de pièces géométriquement complexes, l'approximation simple des polyèdres est inappropriée.

Yau et Menq présentent un système de planification hiérarchique utilisant l'heuristique pour résoudre le problème de la planification de la trajectoire du MMT des pièces complexes générales.

La structure hiérarchique se compose de trois niveaux de planification de trajectoire correspondant aux trois collisions possibles entre une MMT ordinaire et une pièce : (1) la pointe de la sonde, (2) le stylet et (3) la colonne CMM.

Dans leur système de planification automatique de l'inspection, un plan d'inspection initial est d'abord construit en (1) sélectionnant une sonde disponible, (2) déterminant les orientations de la sonde en fonction de l'accessibilité de chaque caractéristique, (3) obtenant des emplacements de mesure pour chaque caractéristique et (4) reliant tous les points ensemble sans tenir compte des interférences.

Une procédure hiérarchique est alors activée pour détecter les collisions. Si des collisions sont détectées, le chemin de la MMT est modifié heuristiquement.

Le type de modification mise en œuvre dépend du type de collision détectée [30].

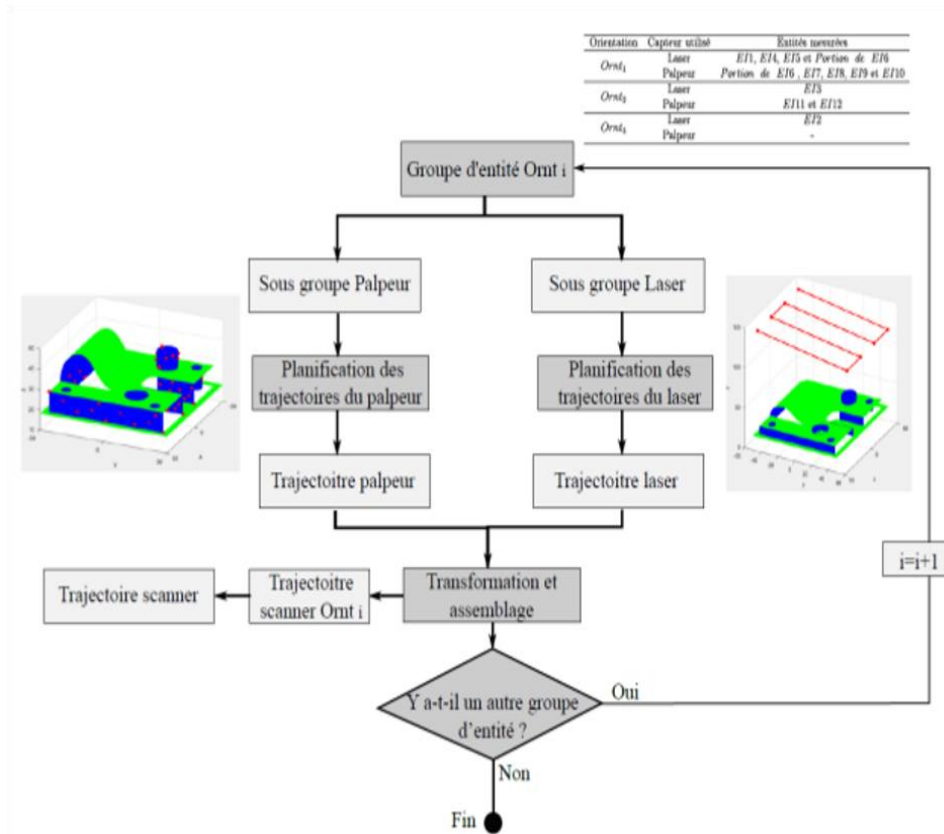


Figure II .14 : Démarche de planification des trajectoires [16].

II.6 Calibrage palpeur et scanner

II.6.1 le palpeur

II.6.1.1 Considérations sur le palpeur

Le palpeur est une partie fondamentale d'une machine à mesurer. L'introduction du palpeur à contact (TTP - Touch Trigger Probe) au début des années 1970 révolutionna le développement de la machine. La machine à mesurer était initialement un dispositif de mesure à fonctionnement manuel pourvu d'un palpeur solide et ayant des applications limitées, grâce à la sensibilité et à la répétitivité du palpeur à contact, elle permet d'effectuer des mesures tridimensionnelles fiables et automatiques.

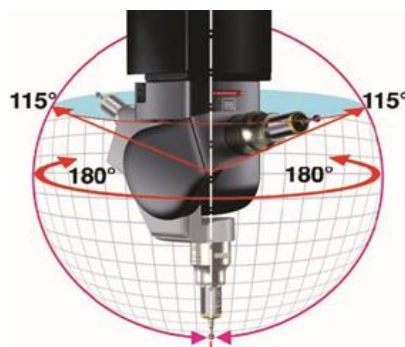


Figure II.15 : Considérations sur le palpeur.

II.6.1.2 Considérations sur la précision

Bien que les palpeurs soient dotés d'une précision élevée, tous ne permettent pas les mêmes mesures. Certains sont montrables sur colonne fixe ou tête orientable, scanning ou point à point, admettant de longs stylets avec étoiles ou non.

La tolérance admise sur une pièce et l'accessibilité influenceront le choix du palpeur.



Figure II.16 : Palpeurs à indexation manuelle.

II.6.1.3 La configuration du palpeur

Une configuration typique d'un palpeur est constituée d'une tête montée sur la colonne de la machine à mesurer, une rallonge éventuelle, un palpeur et un stylet ou une bille.

Le palpeur est le dispositif de déclenchement : il peut s'agir d'un simple dispositif de commutation, un dispositif extensomètre, ou un dispositif optique/laser sans contact.

Sur les palpeurs à contact, le stylet qui est vissé dans le palpeur entre en contact avec la surface. Les types de stylet varient en fonction du type d'application ou de l'élément à palper, les options communes sont les sphères, les cylindres et les disques. Il existe des changeurs de palpeur ou de stylet qui remplacent automatiquement le stylet par un autre outil sur demande du programme-pièce.

L'interface palpeur Chaque axe X, Y et Z de la machine, possède une régie ou est fixée une tête de lecture électronique reliée à une carte électronique de l'axe. Cette carte (une pour chaque axe) se trouve dans la CN et compte les impulsions électroniques envoyées par le lecteur de la régie pour établir la distance parcourue. Avec un palpeur à déclenchement automatique, un signal est envoyé à l'interface palpeur (boîtier électronique) située dans le bureau ou dans la CN, qui communique avec la CN.

Quand le palpeur touche la surface ou se déclenche, il demande aux cartes la position courante des axes. Ces données sont traitées sur l'ordinateur, à travers l'interface palpeur, puis sont utilisées pour des calculs éventuels.

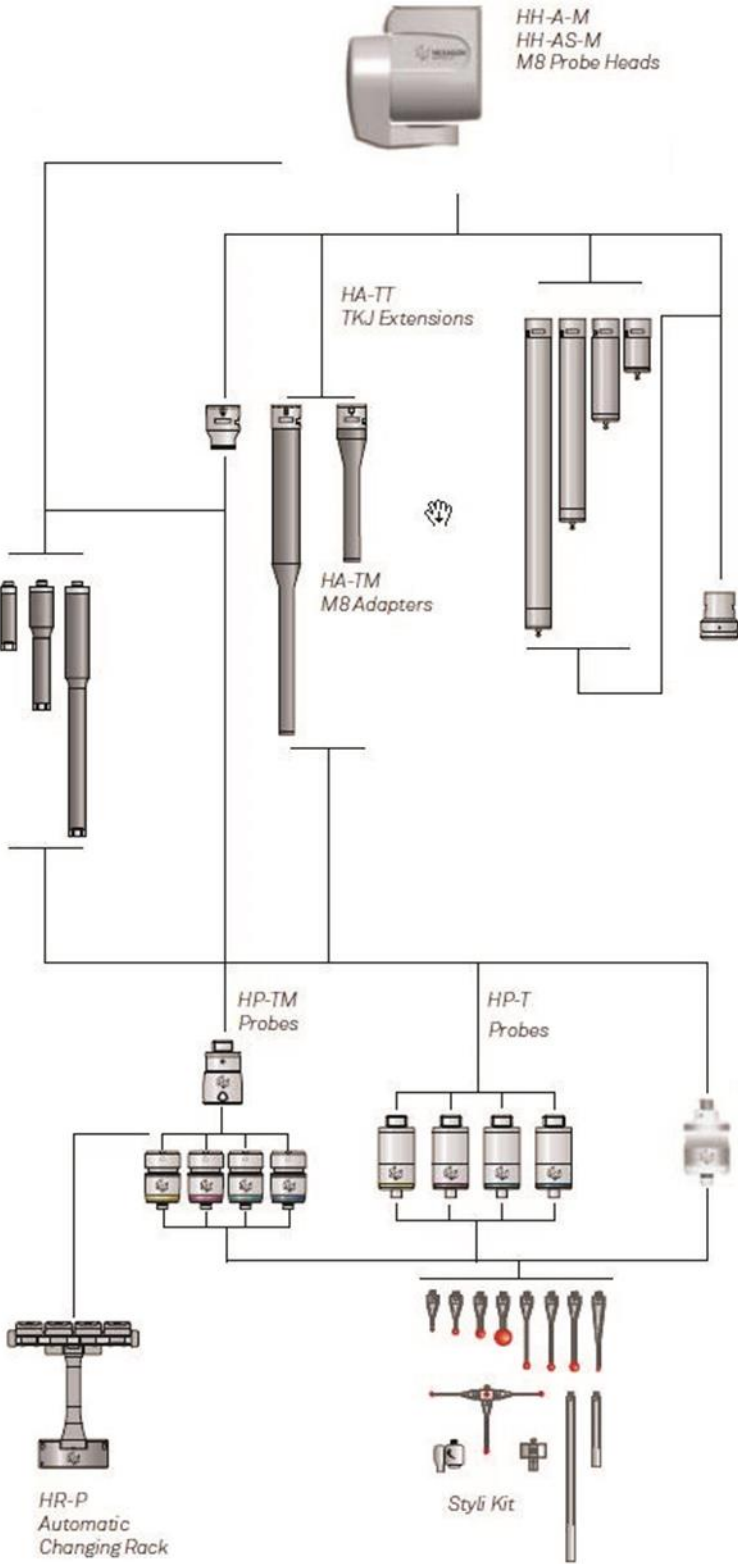


Figure II.17 : configuration d'un palpeur .

II.6.1.4 Etalonnage du palpeur

Avant d'utiliser un palpeur, il faut l'étalonner (On parle aussi « qualifier » ou « calibrer »). Il faut utiliser le logiciel pour mesurer une sphère de calibration au moins dans les positions qui seront utilisées dans le programme.

Le calibrage du palpeur permet au logiciel de calculer où se trouve le centre du stylet en fonction du zéro machine sur les règles et de calculer le diamètre effectif du stylet.

Le diamètre effectif du stylet peut être légèrement différent de son diamètre nominal à cause des forces impliquées dans le palpeur et du palpé sur la surface de la sphère de calibration.

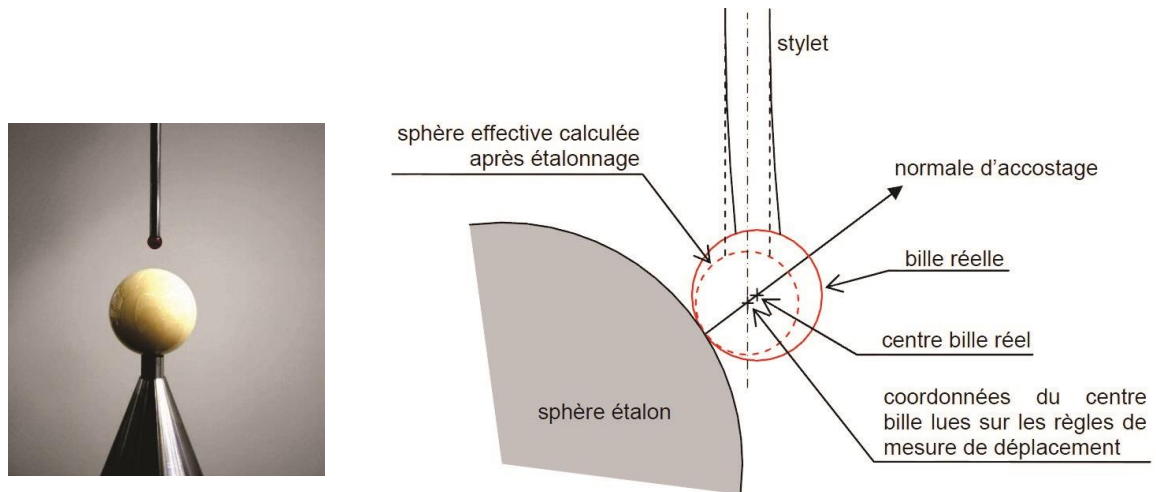


Figure II.18 : Etalonnage du palpeur.

Le logiciel de la machine à mesurer calcule le diamètre de la sphère à l'aide du nombre de points relevés en ignorant le diamètre nominal du stylet, il soustrait le diamètre connu de la sphère de calibration et le reste correspond au diamètre effectif du stylet. Quand le logiciel effectue le calcul des éléments, il utilise le diamètre effectif.

II.6.2 Processus de calibrage d'un palpeur

Pour lancer le processus de calibrage, vous devez définir un outil de qualification. Le type de mesure à prendre sur l'outil dépend du type d'outil (en général, une SPHÈRE) et du type de contact (BOULE, DISQUE, FUSEAU, TIGE, OPTIQUE).

La direction requise du vecteur est l'orientation de la tige de la sphère.

Saisissez le diamètre certifié de la sphère.

Cliquez sur OK pour valider vos entrées.

Assurez-vous que l'outil que vous voulez utiliser pour le calibrage est sélectionné dans la boîte à liste Outils disponibles.

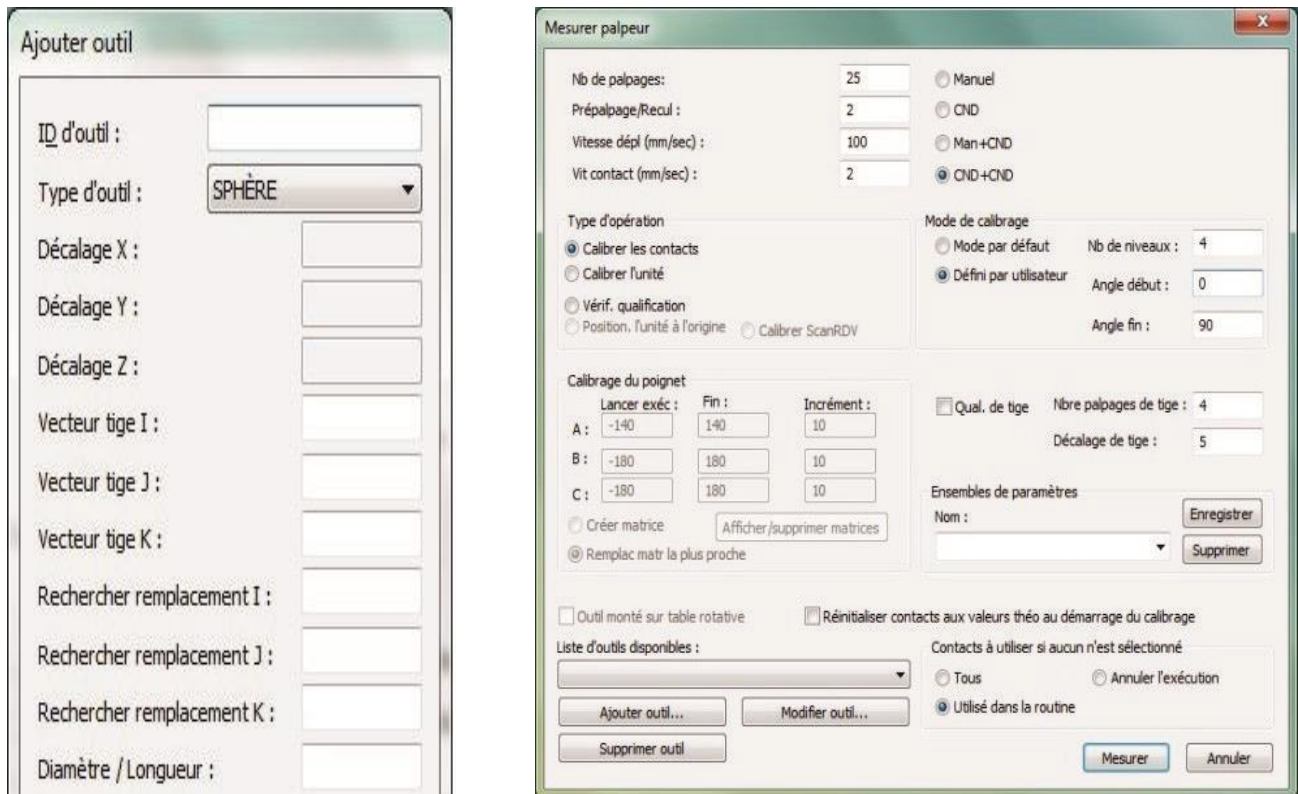


Figure II.19 : Calibrage d'un palpeur.

Entrez le Nb de palpations voulu (4 points minimums), pour une sphère, PCDMIS propose comme valeur prédéfinie 5 points. Pour une tête de scanning, 25 points sont préconisés.

Entrez la distance de pré palpation (la distance à partir de la position théorique du point que la machine à mesurer parcourra à la vitesse de déplacement avant de passer à la vitesse de contact) - ou acceptez celle prédéfinie.

Entrez la Vitesse de déplacement et Vitesse d'entrée en contact ou acceptez celles prédéfinies. Pour une tête de scanning Hexagon, la vitesse de palpation doit être à 2 mm /min maximum.

Sélectionner Manuel, MAN+CND, CND ou CND+CND pour le calibrage
Après avoir effectué toutes les sélections, cliquez sur le bouton Mesurer [9].

II.6.3 Calibrage d'un scanner

Le calibrage d'un scanner MMT (Machine à Mesurer Tridimensionnelle) est une étape importante pour s'assurer que les mesures effectuées sont précises et fiables. Le processus de calibrage implique de vérifier et de régler les paramètres du scanner pour s'assurer qu'il mesure avec précision dans les trois dimensions.

Voici les étapes générales pour calibrer un scanner MMT :

1. Vérifier que le scanner MMT est propre et exempt de poussière ou de débris. Tout écart dans la propreté peut affecter les mesures.
2. Vérifier l'état des palpeurs et s'assurer qu'ils sont propres et en bon état. Si nécessaire, remplacer les palpeurs endommagés.
3. Vérifier que le scanner MMT est bien aligné sur l'axe X, Y et Z. Si nécessaire, ajuster la position du scanner pour qu'il soit parfaitement aligné.
4. Effectuer un test de précision en utilisant des artefacts de calibration spécifiques. Ces artefacts sont des pièces d'étalonnage conçues pour vérifier les mesures du scanner MMT. Mesurer les artefacts en utilisant différentes orientations et positions pour s'assurer que le scanner mesure avec précision dans toutes les directions.
5. En utilisant les résultats des tests de précision, ajuster les paramètres de calibration du scanner MMT pour corriger les écarts éventuels.
6. Effectuer un nouveau test de précision pour vérifier que le scanner est bien calibré.

Une fois que le scanner MMT est calibré, il est important de maintenir régulièrement la propreté et l'état des palpeurs, de s'assurer que le scanner est bien aligné et de procéder à des tests de précision réguliers pour vérifier que les mesures sont toujours précises.

II.7 Détection et évitement des collisions

II.7.1 Plan de sécurité

Les plans de sécurité créent autour d'une pièce une enveloppe le long de laquelle le palpeur se déplace entre deux éléments de mesure. Après la dernière mesure sur l'élément, le palpeur reste à la profondeur de mesure jusqu'à ce que le système lui demande de mesurer l'élément suivant.

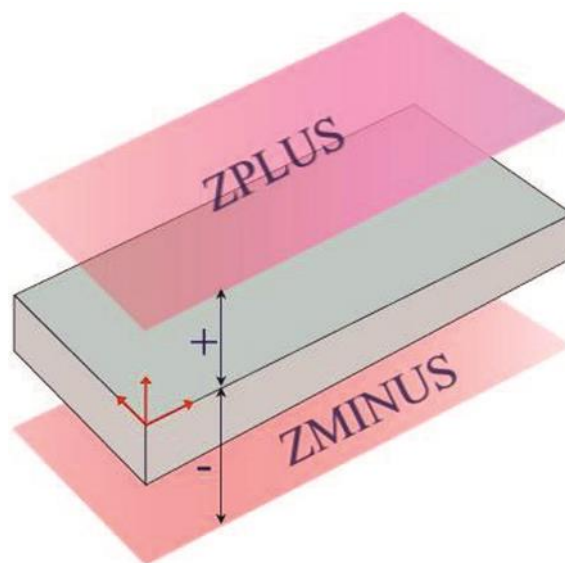


Figure II.20 : Plan de sécurité.

Lors de la définition d'un plan de sécurité, tenez compte du système de coordonnées actuel et de l'origine de la pièce. Faites preuve de prudence pour garantir un espace de sécurité adéquat autour de la pièce.

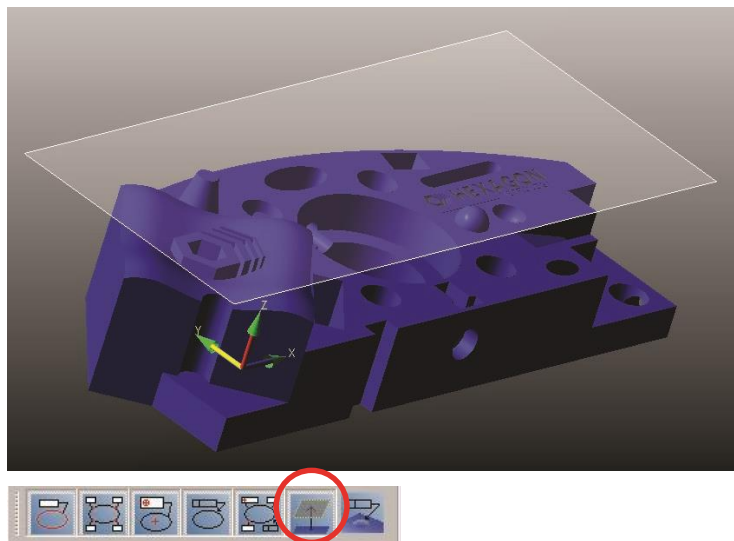


Figure II.21 : Barre d'outils graphiques.

Avec un CAO, il est possible de rendre le plan de sécurité visible en cliquant sur l'icône correspondante de la barre d'outils graphique, tel qu'illustré dans la (Figure II.20) [9].

II.8 Résumé de la littérature actuelle

L'examen de la documentation présentée dans les sections précédentes donne un bref aperçu des faits saillants dans les domaines de la programmation du CGM et de la planification automatisée des inspections. Cet examen met en évidence le fait que beaucoup de travail a été fait dans le domaine de l'intégration des données CAO à la génération automatique d'un plan d'inspection pour une MMT. Cependant, compte tenu de tous ces travaux examinés, il est évident que très peu de recherches sur la planification de l'inspection se concentrent en profondeur sur la génération automatique de l'orientation optimale des pièces pour l'inspection. La décision d'orientation des pièces est généralement prise manuellement, probablement par une personne expérimentée dans le domaine de l'inspection des MMT. Une fois que la décision est prise et que la pièce est placée sur la table CMM, les systèmes développés effectuent souvent la tâche de localisation de la pièce comme point de départ.

Le principal travail effectué à ce jour pour automatiser la décision d'orientation des pièces pour l'inspection des MMT est le système développé par Corrigall et Bell. Cette recherche utilise une technique de décomposition spatiale pour tenir compte de l'accessibilité des caractéristiques, puis analyse les résultats pour déterminer le nombre minimum de configurations de pièces nécessaires pour inspecter toutes les contraintes dimensionnelles et géométriques qui nécessitent une mesure. L'automatisation de la décision d'orientation de la

pièce est également discutée en tant que partie du système basé sur la vision décrit par Majumdar et al.

Les caractéristiques primitives considérées dans cet ouvrage sont toutefois limitées aux fentes. Bien que leur schéma soit basé sur des objectifs similaires à ceux de cette recherche proposée, leur document est très vague et ne décrit qu'un bref aperçu de leur plan d'action. Jusqu'à ce que plus de détails sur ce travail soient publiés, il est difficile d'établir comment ou si le problème d'orientation de la pièce est résolu avec succès. Une recherche majeure réalisée pour résoudre ce problème pour la planification des processus est le développement du système AIFIX par Ferreira et al. Ces chercheurs utilisent une approche de systèmes experts pour automatiser le processus de conception des montages d'usinage. Un système basé sur des règles pour la génération automatique de l'orientation de la pièce pour les opérations d'usinage constitue une grande partie d'AIFIX.

Aborder la décision d'orientation de la pièce de cette manière nécessite l'ajustement dynamique de l'importance relative de chaque objectif d'orientation en fonction de la situation de fabrication spécifique et pertinente. Le problème d'accessibilité des fonctionnalités a été résolu de plusieurs façons, le travail prédominant lié à l'inspection automatisée étant effectué par Spyridi et Requicha. Leur analyse du cône d'accessibilité sert à déterminer la plage d'angles à partir desquels une caractéristique peut être accessible par une sonde CMM. Ce travail a été étendu par plusieurs chercheurs dans le but de créer de meilleurs algorithmes pour la détermination des cônes d'accessibilité locaux et mondiaux. Cette approche résout le problème en déterminant la gamme complète des orientations de sonde réalisables pour l'accessibilité d'une entité donnée. Une autre approche, qui peut simplifier le problème, consiste à ne considérer explicitement que les angles de sonde connus pour être présents sur la MMT disponible.

Ce type d'analyse serait quelque peu similaire à la méthode présentée par Joshi et Chang pour résoudre le problème de la direction de l'approche de l'outil. Toutefois, plutôt qu'un ensemble de directions d'approche réalisables pour les outils, un ensemble d'angles de sonde CMM réalisables/disponibles servirait d'entrée au système. Chaque angle de l'ensemble serait ensuite analysé d'une manière ou d'une autre pour déterminer si son utilisation entraîne une collision avec une partie quelconque de la pièce.

Un autre problème lié à la planification automatisée des inspections est la question de la détermination des points de mesure réels sur une fonction pour vérifier les tolérances données. Ce problème nécessite un équilibre entre plusieurs objectifs, souvent contradictoires : (1) minimiser le nombre de points d'inspection pour réduire le temps et le coût de l'inspection, (2) maximiser le nombre de points d'inspection pour améliorer la précision de l'échantillon statistique, (3) échantillonner les points de mesure à partir d'un schéma de distribution d'échantillonnage acceptable pour augmenter la probabilité de détecter toute erreur systématique présente dans le processus de fabrication, et (4) déterminer les points de mesure en fonction de la fonction et des critères d'inspection de l'entité, et avec une certaine connaissance de l'algorithme géométrique utilisé pour l'évaluation.

Bien que plusieurs travaux aient été cités qui déterminent le nombre de points d'échantillonnage nécessaires pour accomplir certaines tâches spécifiques, aucun d'entre eux ne présente un plan global sur la façon d'échantillonner les points, c'est-à-dire l'emplacement et le nombre de points. La planification de la trajectoire de la sonde entre les points d'échantillonnage désignés est le dernier problème abordé dans la revue de la littérature. Le problème de planification de trajectoire pour une orientation de pièce donnée est rendu intéressant par la question de l'évitement des collisions.

L'objectif est de minimiser la distance parcourue par la sonde CMM lors de l'inspection, tout en évitant toute collision entre la sonde et la pièce elle-même. Parce que le problème de planification de trajectoire de MMT est si similaire à de nombreux problèmes de planification de trajectoire de robot, beaucoup des mêmes algorithmes et concepts ont été utilisés. Yau et Menq cependant, présentent une solution heuristique avec une structure hiérarchique qui est unique au problème de planification de chemin CMM uniquement [31].

Conclusion

En conclusion, la métrologie des coordonnées est un domaine d'expertise indispensable pour garantir la qualité et la conformité des pièces mécaniques. Elle reste un domaine en constante évolution, stimulé par les avancées technologiques et les exigences croissantes de l'industrie de la fabrication.

Chapitre III

TECHNIQUES DE MESURE DES DEFAUTS GEOMETRIQUES

Introduction

Les techniques de mesure des défauts géométriques sont utilisées dans différents domaines industriels pour garantir la qualité des produits fabriqués. Ces défauts peuvent affecter les dimensions, la forme ou l'alignement d'une pièce, ce qui peut avoir un impact sur son fonctionnement et sa performance.

Les techniques de mesure des défauts géométriques comprennent une variété d'outils et de méthodes qui permettent de quantifier et de caractériser les défauts de différentes manières. Ces outils peuvent inclure des instruments de mesure tels que des micromètres, des comparateurs de mesure, des projecteurs de profil, des scanners laser et des machines à mesurer tridimensionnelles.

Les mesures des défauts géométriques sont souvent réalisées à l'aide de logiciels de modélisation et d'analyse, qui permettent de visualiser les données de mesure, de quantifier les défauts et de générer des rapports de mesure. Ces rapports peuvent être utilisés pour déterminer si une pièce répond aux spécifications de conception ou s'il est nécessaire de la reprendre ou de la réparer.

Dans l'ensemble, les techniques de mesure des défauts géométriques sont essentielles pour garantir la qualité des produits fabriqués et pour assurer leur performance et leur fiabilité.

III.1 Logiciel de control (PC-DMIS)

PC-DMIS est un logiciel de métrologie dimensionnelle utilisé pour programmer des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) afin de mesurer des pièces et des composants avec précision. Le logiciel est développé par la société américaine Hexagon Manufacturing Intelligence.

Le logiciel PC-DMIS est utilisé dans une variété d'applications industrielles pour mesurer des pièces à partir de modèles numériques de conception (CAO), de dessins ou de spécifications. Le logiciel permet aux opérateurs de la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) de programmer rapidement des routines de mesure, de collecter des données précises et de générer des rapports de mesure détaillés.

Les fonctionnalités du logiciel PC-DMIS incluent la programmation de mesure de pièces de formes complexes, la génération de plans de mesure automatiques, la gestion de différents types de capteurs de mesure et la création de rapports de mesure détaillés. Le logiciel est également compatible avec différents formats de fichier CAO, tels que CATIA, NX, SolidWorks et AutoCAD.

PC-DMIS est un logiciel de contrôle de qualité avancé qui peut aider les entreprises à améliorer leur efficacité de production en réduisant les erreurs et les temps d'arrêt de la machine. Il est utilisé dans une variété d'industries, y compris l'automobile, l'aérospatiale, l'électronique, la défense et la fabrication générale [23].

III.2 Mesure par contact

La technique de mesure par palpement tactile consiste à utiliser un système de palpement pour toucher la surface de la pièce à tester et mesurer sa géométrie. Elle est couramment

utilisée dans l'industrie pour mesurer des pièces aux formes complexes telles que des engrenages, des pièces de moteur, des moules et des pièces moulées.

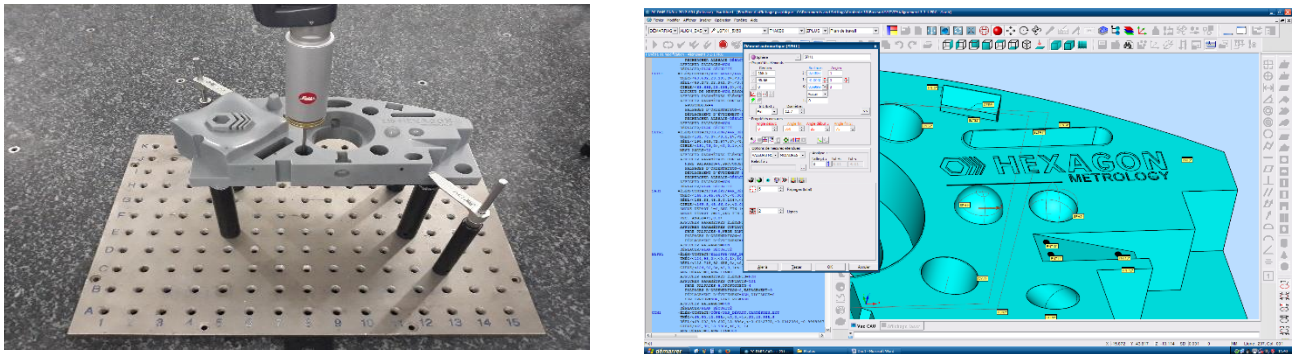


Figure III.1: palpation par contact

III.3 Mesure à distance

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

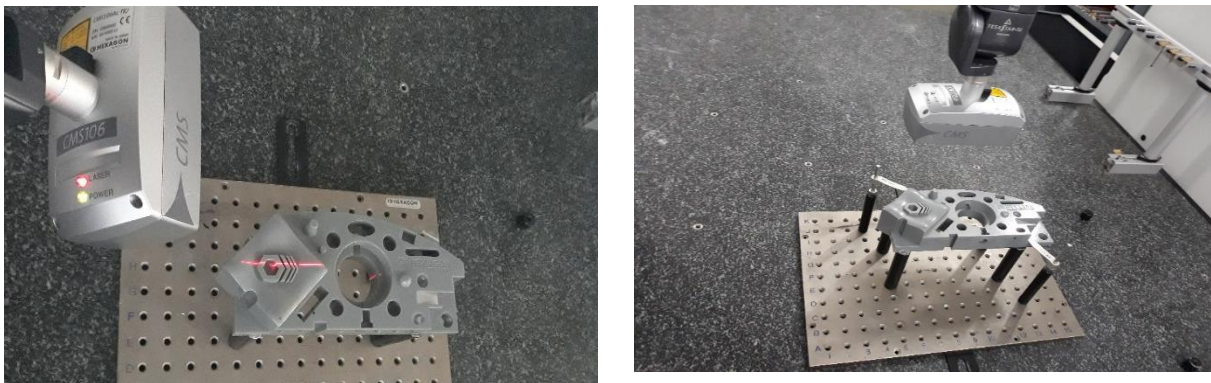


Figure III.2 : mesure avec CMS106

III.4 Établissement des références

La simulation et l'établissement de références partielles sont des techniques couramment utilisées dans la mesure des défauts géométriques. La technique consiste à créer des pièces de référence avec des imperfections géométriques connues et à les utiliser pour calibrer des instruments de mesure. Les références de simulation sont des pièces spécialement conçues avec des imperfections géométriques spécifiques, telles que des irrégularités de surface ou des imperfections de forme. D'autre part, les références partielles présentent des défauts géométriques qui ne couvrent pas toute la surface de la pièce, mais sont localisés dans des parties spécifiques de la pièce. À l'aide de ces simulations et de ces références de pièces,

les techniciens peuvent étalonner des instruments de mesure, tels que des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT), pour s'assurer qu'ils fournissent des mesures précises et fiables des pièces qui leur sont soumises pour inspection.

L'établissement de références simulées et partielles est une étape importante dans la mesure des défauts géométriques car elle permet de s'assurer que les instruments de mesure sont précis et fiables, ce qui est essentiel pour garantir la qualité des produits fabriqués [21].

III.5 Automatisation de l'inspection

III.5.1 Présentation

L'inspection automatique MMT est une approche avancée utilisée dans le domaine de la fabrication industrielle pour l'inspection et la mesure précise des produits. Cette méthode combine des techniques de mesure et des technologies de pointe pour garantir la conformité des produits aux spécifications requises.

La méthode MMT repose sur l'utilisation de capteurs et de dispositifs de mesure précis qui collectent des données sur les produits en cours de fabrication. Ces données sont ensuite traitées par des algorithmes avancés et des modèles statistiques pour effectuer des analyses approfondies et détecter les défauts potentiels.

III.5.2 Alignement des pièces

III.5.2.1 L'alignement

Pour obtenir une mesure correcte des pièces, un bon alignement est aussi important qu'une machine précise et un palpeur qualifié.

Il y a trois alignements principaux, alignement 3-2-1, alignement Best Fit et alignement itératif.

III.5.2.2 Alignement 3-2-1

On effectue des mesures en 3 dimensions X, Y et Z, l'alignement sur une machine à mesurer requiert 3 grandes étapes, qu'il est important d'exécuter dans le bon ordre [9].

1 Nivellement par rapport à la pièce

2- Rotation par rapport à l'axe

3- Définitions de l'origine

III.5.2.3 Alignement manuelle

Nivellement par rapport à la pièce.

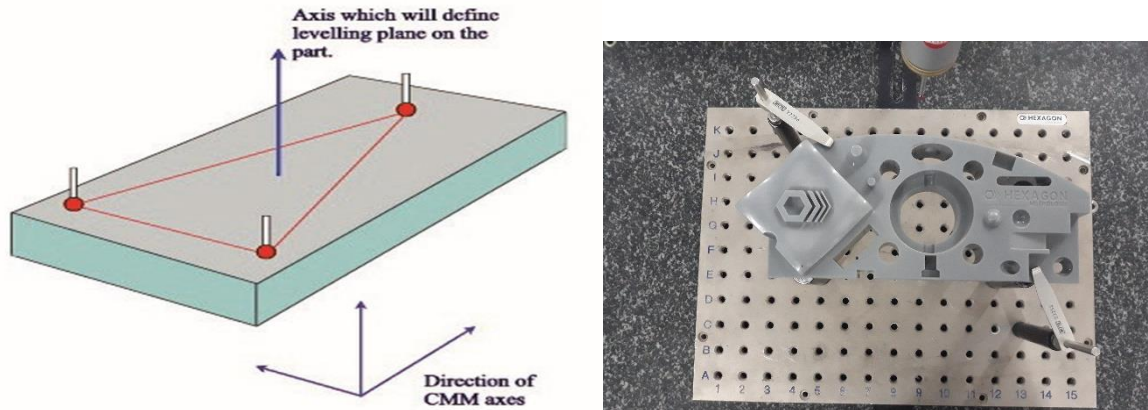
On mesure un plan sur la pièce.

Cette étape a pour but d'assurer que la mesure est perpendiculaire à la pièce et non pas aux axes de la machine.

Il est imprécis de supposer que la pièce repose sur un plan perpendiculaire à l'axe vertical de la machine ; il pourrait y avoir de la saleté sous la pièce ou bien la face sur laquelle la pièce est posée pourrait ne pas être parallèle à la face élément (élément).

Le dessin technique spécifie typiquement quelle est la face élément mais, si tel n'est pas le cas, il suffit de prendre une face ayant une bonne finition de surface et espacer les points autant que possible.

Pour calculer un plan, il faut relever 3 points ou plus si l'on doit calculer le plan moyen et la planéité [9].



III.5.2.3.1 Rotation par rapport à l'axe

La seconde étape consiste à bloquer la rotation de la pièce puisque celle-ci est à présent libre de pivoter.

La direction de palpation est importante (Figure) pour établir la direction du vecteur (ligne) : dans cet exemple, les points sont relevés de gauche à droite. Ce qui crée un axe secondaire dans la direction X+.

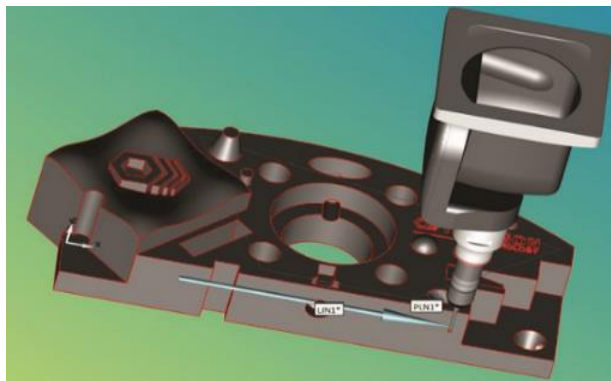


Figure III.4 : Direction de palpation.

III.5.2.3.2 Définition des origines

Une position ou un élément qui se trouve à $X = 0$, $Y = 0$ et $Z = 0$.

III.5.2.4 Alignements automatiques

Après avoir compris les concepts d'alignement 3-2-1, on utilisera l'option Alignement auto plus souvent que la méthode par étapes car elle requiert moins d'opérations. Comme les étapes décrites précédemment sont nécessaires pour l'alignement 3-2-1 de base, elles sont incorporées dans l'option Alignement auto.

L'élément sélectionné en premier sera utilisé comme plan de nivellement dans le plan de travail courant et comme origine de l'axe primaire, le second élément sélectionné sera utilisé comme élément à pivoter et comme origine de l'axe secondaire. Le troisième élément sélectionné sera utilisé comme origine de l'axe tertiaire [9].

III.5.2.5 Alignements Best Fit

Les alignements Best Fit existent en deux ou trois dimensions. Une différence très significative existe entre un ajustement Best Fit 2D et un ajustement Best Fit 3D.

Un Best Fit 2D requiert un alignement initial. L'alignement est créé dans le plan de travail spécifié et est basé sur l'alignement courant.

Un Best Fit 3D utilise les données brutes (machine) et les met en corrélation avec les valeurs Théoriques. Il N'UTILISE PAS un alignement précédent mais en crée un nouveau.

III.5.2.5.1 Types Best Fit disponibles

Moindres carrés (par défaut) : Calcule la moyenne des erreurs de l'ajustement parmi tous les éléments inclus dans l'ajustement Best Fit.

Vecteur - Calcule également la moyenne des erreurs parmi les éléments à ajuster mais accroche aussi les points sur le vecteur nominal de l'élément. Ainsi, toutes les erreurs se trouvent le long des vecteurs.

Exemple : Si le point nominal est : 1.1.1 avec le vecteur : 0,0,1, et les valeurs de Mesure 4,2,0.95, les données mesurées seront ajustées sur 1,1,0.95, accrochées au vecteur 0,0,1.

Contraintes pour les alignements Best Fit 3D : Des contraintes peuvent également être appliquées aux alignements Best Fit 3D. Les options de contrainte sont les suivantes :

Faire tourner et convertir (option par défaut) - Cette option offre une souplesse d'alignement totale lors de la corrélation des données machine avec les données théoriques.

Faire tourner seulement : Cette option restreint l'alignement sur la rotation uniquement, sans appliquer de conversions.

Convertir seulement : Cette option restreint l'alignement à la conversion uniquement, sans appliquer de rotations.

Quand PC-DMIS confronte deux jeux d'éléments, il mesure la différence entre les positions réelles des éléments et les positions nominales correspondantes. Lors de la comparaison entre un ensemble de points et l'élément calculé à travers ces points, PC-DMIS mesure la différence entre les points et leur projection orthogonale sur l'élément.

Le meilleur ajustement essaie de trouver le minimum global pour la méthode utilisée afin de déterminer la distance entre les points et l'élément [8].

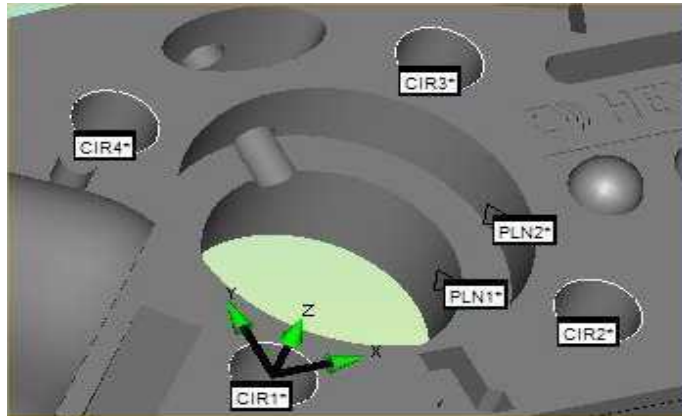


Figure III.5: Alignments Best Fit [8].

III.5.2.5.2 Poids d'élément

Chaque élément utilisé comme entrée a un poids associé. Les valeurs des poids affectent l'alignement résultant.

Plus un élément donné est lourd, plus l'alignement résultant correspondra à la valeur mesurée de cet élément à sa valeur théorique.

Si les poids des éléments d'entrée sont identiques, les erreurs sont distribuées équitablement entre tous les éléments quelle que soit la valeur de pondération.

Les poids sont automatiquement affectés à chaque élément sur la base de sa dimension associée.

S'il n'existe pas de dimension associée, il se voit affecter une tolérance par défaut.

Les poids qui seront affectés peuvent être affichés via le bouton Créer les poids.

Tout poids peut être modifié en sélectionnant l'élément dans la liste des entrées et en cliquant sur le bouton Modifier le poids. Le nouveau poids est affecté à cet élément et utilisé au cours des calculs [8].

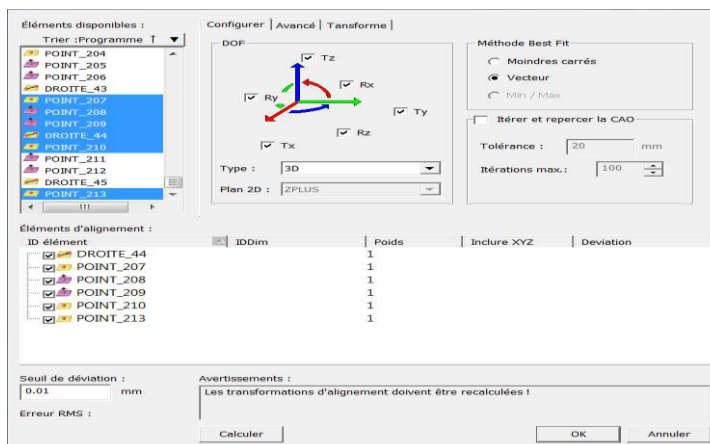


Figure III.6 : Modification des poids

III.5.2.5.3 Best Fit 2D (exemple)

Alignez la pièce en utilisant la face supérieure (A) (niveau), le bord avant (B) (Rotation) et le bord gauche (C) (origine) .

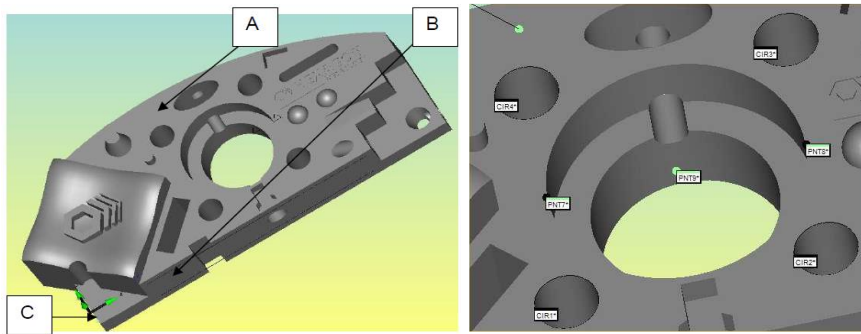


Figure III.7 : exemple Best Fit 2D.

Au terme de la mesure, sélectionnez Utilitaires d'alignement puis la fonction Best Fit. Sélectionnez les 4 cercles dans la boîte à liste Éléments d'alignement. Contrôlez que vous avez sélectionné correctement l'option d'alignement, les caractéristiques requises de poids et la méthode best-fit.

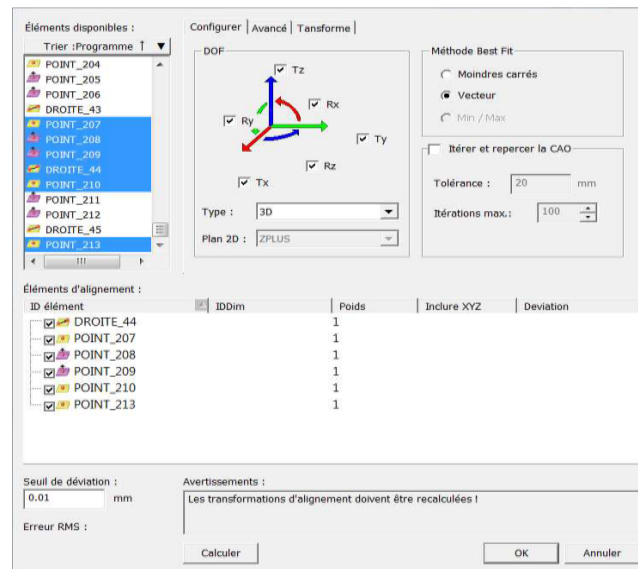


Figure III.8 : Création d'un alignement Best Fit.

Quand les caractéristiques requises de best-fit auront été sélectionnées, les utilitaires d'alignement montreront le type de best-fit créé [8].

III.5.2.6 Alignement itératif

Création d'un alignement itératif

A. Alignement itératif avec 6 points

Mesurez six points en sélectionnant les positions nominales du modèle CAO.

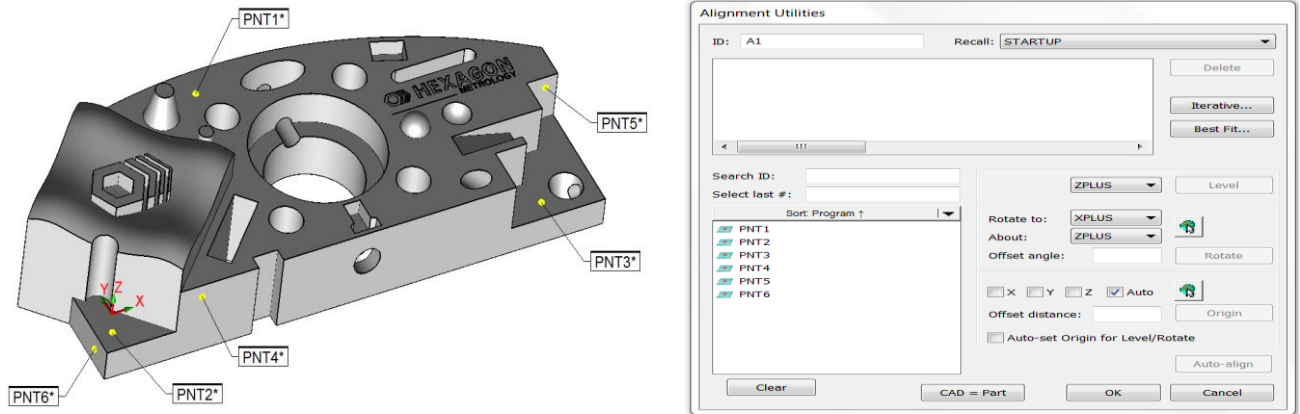


Figure III.9 : Création d'un alignement itératif.

Ouvrez la boîte de dialogue Alignement Utilities/Utilitaires d'alignement. Insert – Alignement – New [7].

Cliquez sur le bouton Itérative/Itératif. La boîte de dialogue Itérative Alignement/Alignement itératif s'ouvre. Utilisez cette boîte de dialogue pour créer un alignement itératif.

Dans la case Feature List/Liste des entités, sélectionnez le premier jeu d'entités (trois entités au moins) à utiliser pour orienter l'axe normal du plan de travail en cours.

Vérifiez que l'option Level/Niveau est sélectionnée.

Cliquez sur le bouton Select/Sélectionner.

Avec la souris, sélectionnez le deuxième jeu d'entités (deux entités au moins) à utiliser pendant le processus de rotation.

Vérifiez que l'option Rotate/Rotation est sélectionnée.

Cliquez sur le bouton Select/Sélectionner.

Sélectionnez le dernier jeu d'entités (une entité au moins) qui donne l'emplacement désiré de l'origine de la pièce. (On peut utiliser les mêmes entités pour plus d'un processus.)

Vérifiez que l'option Origin/Origine est sélectionnée.

Cliquez sur le bouton Select/Sélectionner.

Entrez un rayon prévu pour le point, comme indiqué.

Il est important de comprendre les options de mesure pour un alignement itératif. Voici les scénarii possibles :

Mesure all once.

Mesure all always.

B. Options de convergence

Rayon ciblé du point

ZONE RADIALE autour de chaque cible, à l'intérieur de laquelle il faut palper le point. Cette valeur ne doit pas être trop faible, sinon l'alignement ne saura pas se faire tout seul. On peut spécifier un maximum d'itérations pour empêcher cela.

Tolérance de la fonction

Ecart toléré sur la surface, quand plus de points que le minimum de points sont mesurés pour une action particulière. Si on prend, par exemple, 4 points pour un niveau, alors tous ces 4

points ne peuvent pas être remis à zéro et auront un écart associé. L'entrée d'une valeur, pour la tolérance, permet à l'utilisateur de contrôler l'écart si un point est hors tolérance.

Etiquette erreur

PC-DMIS peut passer à cette étiquette si les critères de tolérance de la fonction ne sont pas réunis.

Cliquez sur OK. La boîte de dialogue Alignement itératif se ferme.

Cliquez sur OK dans la boîte de dialogue Utilitaires d'alignement pour terminer [7].



Exécutez le programme.

Mesurez manuellement le jeu de points indiqué à l'écran. Après la première séquence de mesures, PC-DMIS détermine la courbe de corrélation des points mesurés, par rapport à leur position théorique et compare la position réelle avec la position nominale. S'il y a des points en dehors du rayon prévu, il faudra mesurer de nouveau ces points. PC-DMIS invite à positionner le palpeur à un endroit sûr pour refaire la mesure des points situés au-delà du rayon prévu.

A la fin la pièce est alignée sur la CAO nominale [7].

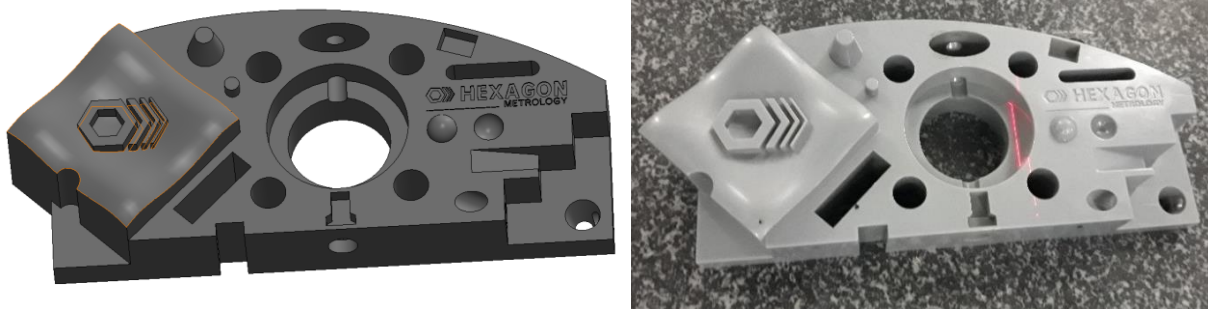
Conclusion

Les techniques de mesure des défauts géométriques sont des outils essentiels pour assurer la qualité et la conformité des produits dans divers domaines industriels. Elles permettent une évaluation précise des caractéristiques géométriques des produits, facilitant ainsi la détection et la quantification des défauts potentiels. Grâce à ces techniques, les fabricants peuvent améliorer la satisfaction des clients, optimiser leurs processus de fabrication et réduire les coûts liés aux défauts de production. En intégrant ces techniques dans leurs processus de contrôle qualité.

Chapitre IV
ETUDE DE CAS INSPECTION D'UNE PIECE
MODELE SUR MMT

Introduction

Afin de développer un protocole métrologique pour l'analyse des spécifications géométriques des pièces mécaniques à l'aide de la MMT, une pièce modèle a été sélectionnée. La pièce, nommée HEXBLOCK WIREFRAME SURFACE (Figure IV.1), appartient à une société française spécialisée dans la formation métrologique et contient presque toutes les formes nécessaires pour se former à la mesure de toutes sortes. Cette pièce a été soigneusement préparée par l'entreprise pour répondre aux différents besoins en mesure.



CAO Pièce modèle

Pièce modèle

Figure IV.1 : Pièce modèle (HEXBLOCK WIREFRAME SURFACE).

Dans le cadre de cette étude, une étude expérimentale approfondie sera menée sur la pièce modèle afin de se familiariser avec les mesures les plus importantes pour le développement du protocole. Cette étape est cruciale pour s'assurer que toutes les spécifications géométriques de la pièce sont mesurées avec précision et conformément aux normes de qualité requises.

L'étude expérimentale consistera en plusieurs étapes, notamment l'analyse des différentes caractéristiques géométriques de la pièce, telles que la planéité, la perpendicularité, la circularité, la cylindricité, la coaxialité, la concentricité et bien d'autres. Des mesures précises seront prises en utilisant la MMT, qui est un équipement de mesure de haute précision, pour s'assurer que les résultats obtenus sont fiables et cohérents.

Ensuite, les données de mesure seront analysées à l'aide de logiciels de traitement des données pour déterminer la précision et la fiabilité de la méthode de mesure utilisée. Si nécessaire, des ajustements et des modifications seront apportés pour améliorer la précision des mesures et garantir que les spécifications géométriques sont respectées.

En conclusion, l'étude expérimentale de la pièce modèle HEXBLOCK WIREFRAME SURFACE sera un élément clé dans le développement d'un protocole métrologique fiable et précis pour l'analyse des spécifications géométriques des pièces mécaniques. Cette étude permettra de se familiariser avec les mesures importantes et de garantir que toutes les

spécifications géométriques sont mesurées avec précision et conformément aux normes de qualité requises.

IV.1 Hexagone Metrology

Hexagone Metrology est une société française spécialisée dans la fourniture de solutions de métrologie industrielles pour divers secteurs tels que l'automobile, l'aérospatiale, l'énergie, la construction navale et la fabrication industrielle.

Hexagon Metrology propose une gamme de produits et de services pour aider les entreprises à améliorer la qualité de leurs produits et à optimiser leur processus de production. Cela inclut des instruments de mesure de haute précision tels que des bras de mesure, des scanners laser et des machines de mesure par coordonnées (MMT). Ils fournissent également des logiciels de métrologie pour l'analyse et la visualisation de données, ainsi que des services de formation, de maintenance et de support technique pour leurs produits.

La société a été fondée en 1992 et son siège social est situé à Meylan, en France. Elle fait partie du groupe Hexagon AB, une entreprise suédoise de technologie qui fournit des solutions de mesure, de conception et de visualisation pour diverses industries à travers le monde.

IV.2 Equipements utilisés

IV.2.1 Machine de mesure tridimensionnelle MMT

La marque de la machine utilisée pour notre protocole métrologique est HEXAGON GLOBAL. Elle dispose d'une précision de mesure très élevée grâce à ses six axes de mesure, qui permettent de réaliser des contrôles dimensionnels très précis sur des pièces mécaniques complexes. Ces six axes peuvent être gérés de manière indépendante, ce qui permet de réaliser des mesures dans différentes directions et avec une grande précision.

Le système de commande B3C-LC est un élément clé de la machine à mesurer HEXAGON GLOBAL. Ce système est capable de commander la machine à mesurer de différentes manières, selon les besoins du protocole métrologique. En mode point par point, le système mesure la distance entre deux points spécifiques sur une pièce, tandis qu'en mode continu, il mesure des zones plus grandes en utilisant des balayages continus.

En outre, le système de commande B3C-LC peut être utilisé dans un système de mesure à un ou deux bras. Cela signifie que les mesures peuvent être effectuées à l'aide d'un seul bras, ou que deux bras peuvent être utilisés pour mesurer différentes parties de la pièce simultanément. Cela permet une grande flexibilité dans la réalisation des mesures, et permet d'optimiser le temps et les ressources nécessaires pour effectuer des contrôles dimensionnels.

Les axes linéaires X, Y et Z sont toujours gérés par le système de commande B3C-LC. Ils permettent de réaliser des mesures en mouvement rectiligne, en utilisant les directions

horizontales et verticales. Les axes A, B et W ne sont gérés que si les composants optionnels correspondants sont installés sur la machine à mesurer. Par exemple, un poignet ou une tête de mesure peut être installé pour que les axes Pitch et Roll correspondent aux axes A et B, respectivement. De même, un capteur vidéo peut être installé pour que l'axe Yaw corresponde à l'axe W.

En utilisant tous ces éléments, nous sommes en mesure de réaliser des contrôles dimensionnels précis sur une grande variété de pièces mécaniques complexes. Les mesures sont effectuées avec une grande précision et une grande fiabilité, ce qui permet d'assurer la qualité des produits fabriqués et de garantir la satisfaction des clients.

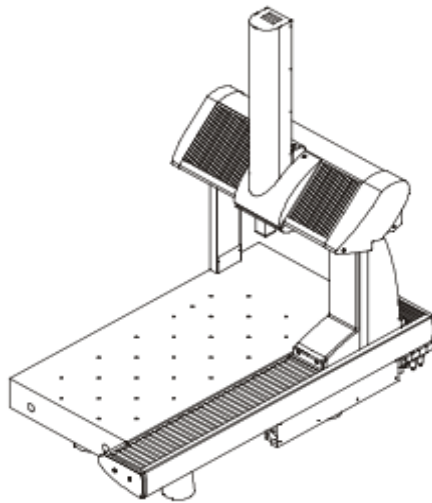


Figure IV. 2 : MMT HEXAGON GLOBAL.

IV.2.2 Capture (Système CMS106 sur MMT)

Le capteur fonctionne par triangulation laser scannée. Un faisceau laser incident est projeté sur l'objet et la réflexion est détectée sur un CCD. L'emplacement de la réflexion est proportionnel à la distance à l'objet. Un circuit optique indépendant surveille le signal réfléchi et ajuste en temps réel la puissance du laser en conséquence. En utilisant un axe de balayage motorisé, le faisceau mesure un profil de surface.



Figure IV. 3. Système CMS106 sur MMT

Caractéristique

| | |
|---|---|
| Laser | Classe2 (laser à impulsions 690 [nm]) 170 ± |
| Stand Off (Z) | 30 mm |
| Longueur de la ligne laser | 24 mm, 60 mm, 124 mm |
| Précision du capteur | ± 20um MPE |
| La fréquence | 53 Hz |
| Lumière ambiante | 40 000 lx |
| Plage de température de fonctionnement | 10 à 42 C |
| Plage de précision déclarée | 15 à 32 C |
| Temps de préchauffage pour la communication PC de précision déclarée | 20 minutes |
| Taille et poids (capteur) AJ Taille et poids (capteur) TKJ Taille et poids (contrôleur) Alimentation | LAN Ethernet |
| | 134 × 60 (87) × 72 mm / 360 g 134 × 60 (98) × 72 mm / 379 g 88 × 146 × 240 mm / 2100 g AC90 - 240V 0,5A |
| Température de stockage | - 25 à +70 C |

Tableau IV.1 : propriétés Système CMS106.

IV.2.3 Logiciel PC-DIMIS

PCDMIS est un logiciel de mesure dimensionnelle 3D développé par la société américaine Hexagon Manufacturing Intelligence. Il est largement utilisé dans l'industrie manufacturière pour effectuer des mesures de pièces et des analyses dimensionnelles précises. Le logiciel PCDMIS est compatible avec une variété de machines de mesure, notamment les bras de mesure portables, les machines à mesurer tridimensionnelles (MMT), les scanners laser, les scanners optiques, etc. Il offre une interface utilisateur graphique conviviale, qui permet aux utilisateurs de créer des programmes de mesure, d'importer des modèles CAO et de contrôler les machines de mesure.

Pour contrôler la pièce, nous devons avoir les données suivantes : pièce modèle, CAO, plans 2d.

IV.2.4 Plans pièce modèle

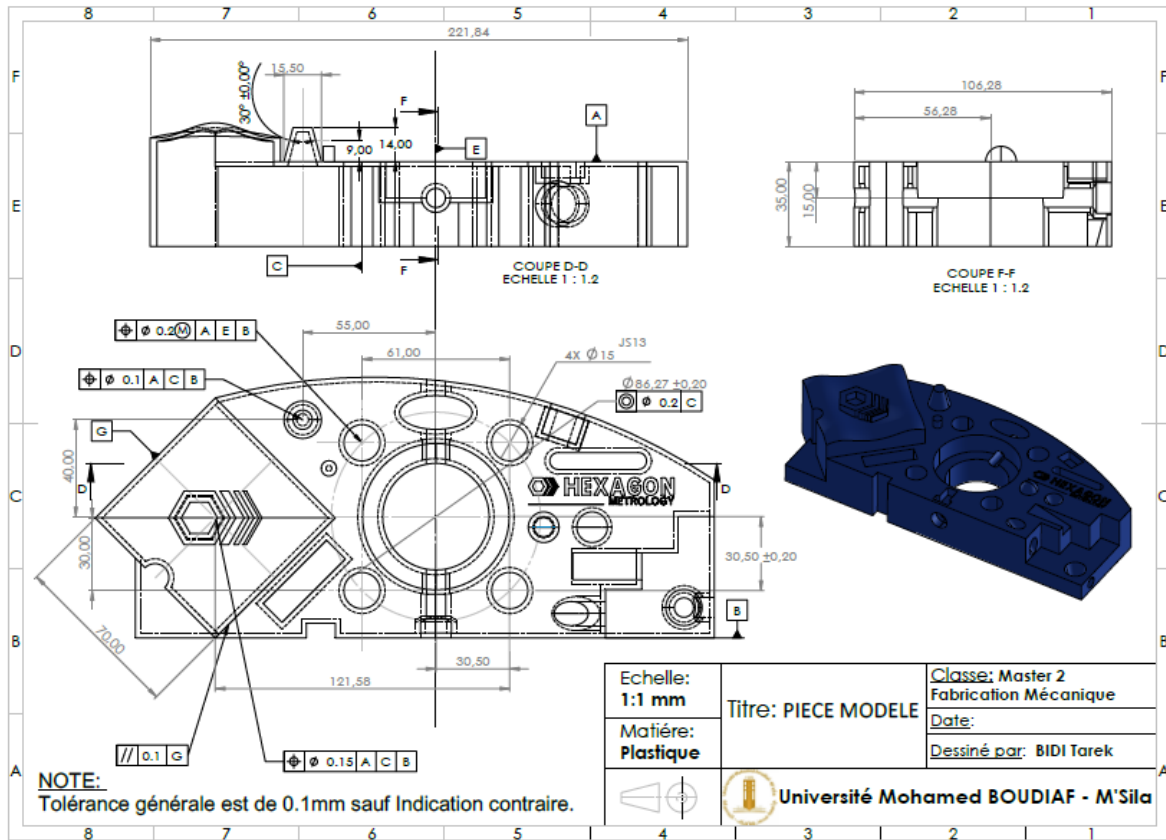


Figure IV.4 : Plans pièce modèle.

IV.2.5 CAO Pièce modèle

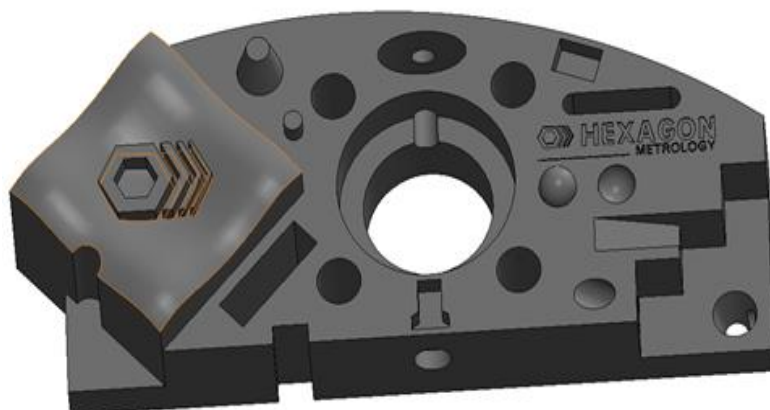


Figure IV.5 : Pièce modèle CAO

IV.2.6 Pièce modèle

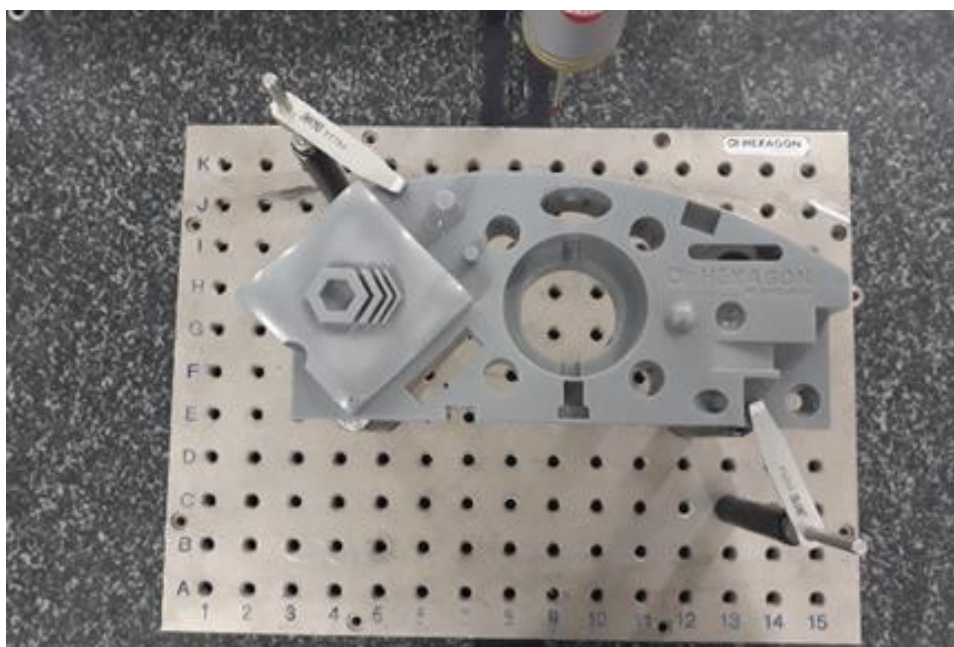
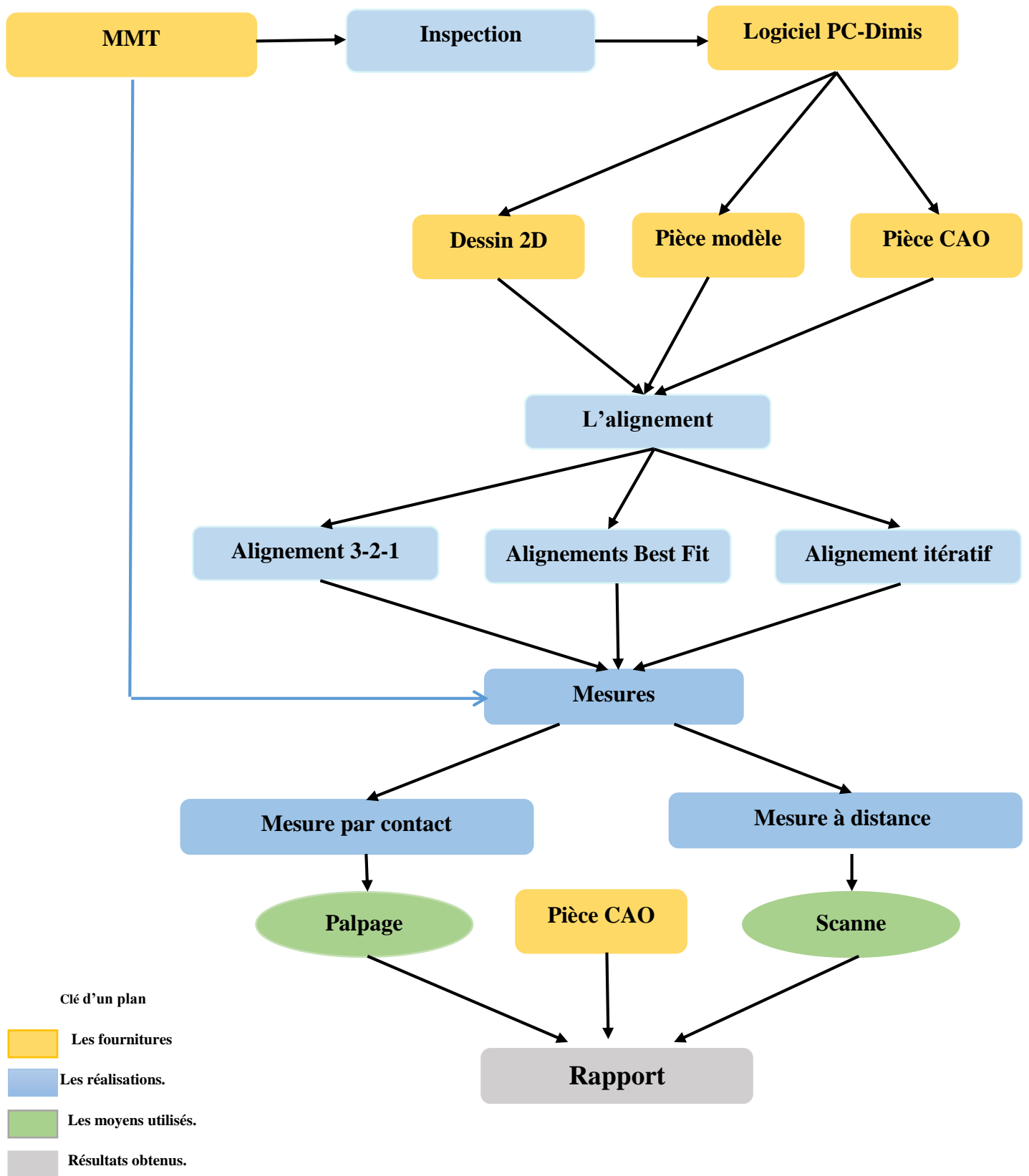


Figure IV.6 : Pièce modèle plastique.

IV.3 Protocole métrologique sur MMT pour l'analyse des spécifications géométriques des pièces mécaniques.



IV.4 Alignement 3-2-1

Les mesures en 3 dimensions, dans les axes X, Y et Z, nécessitent un alignement précis sur une machine à mesurer tridimensionnelle. Ce processus d'alignement se décompose en trois étapes clés qui doivent être exécutées dans l'ordre approprié. Il est essentiel de respecter cette séquence pour assurer des résultats fiables et précis.

IV.5 Mesure par contact et Mesure à distance

Le rapport de mesure généré par la machine à mesurer tridimensionnelle MMT aide à évaluer la qualité des pièces et composants mesurés et à vérifier leur conformité aux spécifications requises.

Le rapport comprend généralement des informations sur les dimensions mesurées et les dimensions nominales, ainsi que sur les écarts et les différences entre eux. Le rapport peut également inclure des détails sur la géométrie de la pièce, tels que les coudes, les écarts angulaires et les distances entre les points mesurés, Ils sont représentés sous forme de tableaux.

IV.5.1 Mesure d'un cylindre

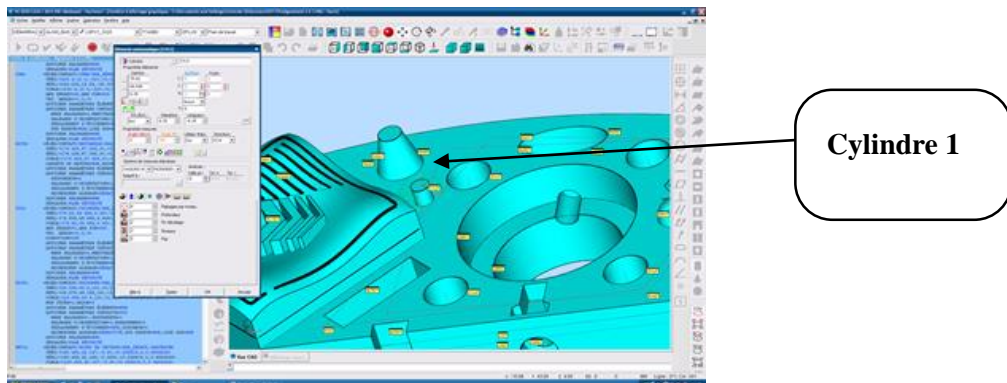


Figure IV.7: Mesure un cylindre.

Rapport d'un cylindre (Mesure par contact)

| # | MM | N°03 - CYL5 | | | | |
|----|-----------|-------------|--------|-------|--------|--------------|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 6.350 | 0.200 | -0.200 | 6.167 | -0.183 | 0.000 |

Rapport d'un cylindre (Mesure à distance)

Chapitre IV : ETUDE DE CAS INSPECTION D'UNE PIECE MODELE SUR MMT

| # | MM | N°04 - CYL1 | | | | |
|----|-----------|-------------|--------|---------|--------|----------|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| X | -44.180 | 0.200 | -0.200 | -42.775 | 1.405 | 1.205 |
| Y | 19.948 | 0.200 | -0.200 | 23.178 | 3.230 | 3.030 |
| D | 6.350 | 0.200 | -0.200 | 6.093 | -0.257 | 0.057 |
| H | -6.350 | 0.200 | -0.200 | -6.350 | 0.000 | 0.000 |

Analyse :

Les résultats présentés dans le rapport de machine de mesure tridimensionnel semblent positifs, car les dimensions du cylindre ont été mesurées à l'aide de deux méthodes : le palpeur et le scanner. Les deux méthodes ont abouti à des résultats similaires, ce qui indique que les dimensions du cylindre se situent dans la plage de tolérance et sont acceptables par rapport aux dimensions requises.

Ces résultats reflètent que le processus de mesure a été effectué strictement selon les normes spécifiées, ce qui signifie que le cylindre répond aux spécifications nominal.

IV.5.2 Mesure d'un cône

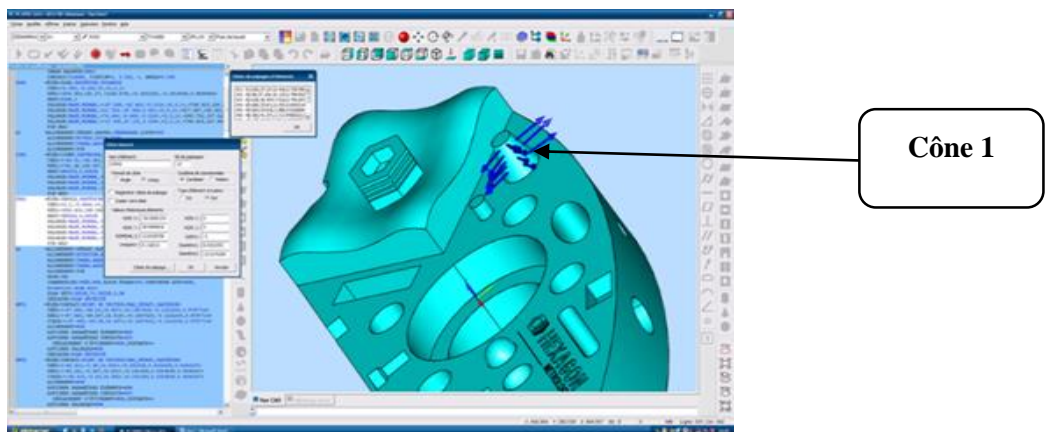


Figure IV.8: Mesure d'un cône.

Rapport d'un cône (Mesure par contact)

| # | MM | N°04 - CON1 | | | | |
|----|-----------|-------------|--------|--------|--------|----------|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| A | 30.000 | 0.200 | -0.200 | 29.793 | -0.207 | 0.007 |
| L | 13.995 | 0.200 | -0.200 | 14.148 | 0.153 | 0.000 |

Rapport d'un cône (Mesure à distance)

| ⊕ | MM | N°03 - CON1 | | | | |
|----|-----------|-------------|--------|---------|--------|--------------|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| X | -55.000 | 0.200 | -0.200 | -55.298 | -0.298 | 0.098 |
| Y | 40.000 | 0.200 | -0.200 | 40.554 | 0.554 | 0.354 |
| Z | 13.995 | 0.200 | -0.200 | 13.998 | 0.003 | 0.000 |
| A | 30.000 | 0.010 | -0.010 | 30.000 | 0.000 | 0.000 |
| L | 13.995 | 0.200 | -0.200 | 13.995 | 0.000 | 0.000 |

Analyse

Le rapport présente les résultats de la mesure du cône en utilisant à la fois un palpeur et un scanner. Les résultats obtenus démontrent des mesures positives et considérées comme acceptables.

Grâce à l'utilisation du scanner, les mesures ont abouti à des dimensions correspondant exactement aux spécifications nominales du cône. Cela souligne la précision des mesures effectuées à l'aide de cette méthode.

Quant au palpeur, les résultats révèlent un léger écart par rapport aux dimensions nominales, mais celui-ci reste dans la plage autorisée. Cela indique que les dimensions mesurées du cône restent acceptables et correspondent généralement aux dimensions nominales.

Sur cette base, nous pouvons confirmer que le cône satisfait aux spécifications nominales et que le processus de mesure a été réalisé rigoureusement selon les normes en vigueur.

IV.5.3 Mesure d'un cercle

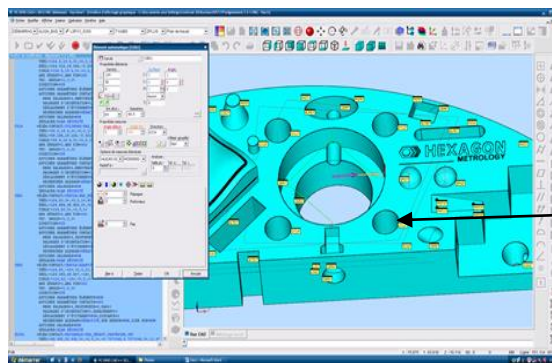


Figure IV.9 : Mesure un cercle.

Rapport d'un cercle (Mesure par contact)

| ⊕ | MM | N°11 - CER3 | | | | |
|----|-----------|-------------|--------|--------|-------|--------------|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 12.700 | 0.200 | -0.200 | 12.879 | 0.179 | 0.000 |

Rapport d'un cercle (Mesure à distance)

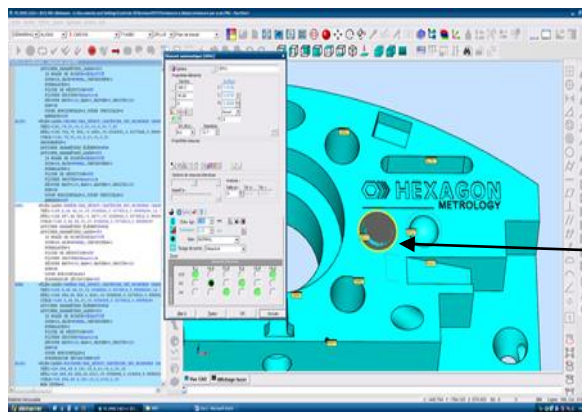
Cercle 3

| # | MM | N°02-3 - CER3 | | | | |
|----|-----------|---------------|--------|--------|-------|--------------|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 12.700 | 0.200 | -0.200 | 12.891 | 0.191 | 0.000 |

Analyse

Les mesures des dimensions du cercle effectuées à l'aide d'un palpeur et d'un scanner ont donné des résultats similaires, démontrant ainsi la précision des mesures réalisées avec les deux méthodes. De plus, les résultats ont confirmé que les dimensions du cercle se trouvent dans la plage de tolérance et correspondent aux spécifications nominales. Cela confirme que le composant répond aux spécifications requises.

IV.5.4 Mesure d'une sphère



Sphère 1

Figure IV.10 : Mesure d'une sphère.

Rapport d'une sphère (Mesure par contact)

| # | MM | N°07 - SPH1 | | | | |
|----|-----------|-------------|--------|--------|--------|--------------|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 12.700 | 0.200 | -0.200 | 12.408 | -0.292 | 0.092 |

Rapport d'une sphère (Mesure à distance)

| # | MM | N°08 - SPH1 | | | | |
|----|-----------|-------------|--------|--------|--------|--------------|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| X | 44.500 | 0.200 | -0.200 | 44.367 | -0.133 | 0.000 |
| Y | -4.340 | 0.200 | -0.200 | -4.347 | -0.007 | 0.000 |
| Z | 0.000 | 0.200 | -0.200 | -1.947 | -1.947 | 1.747 |
| D | 12.700 | 0.200 | -0.200 | 12.285 | -0.415 | 0.215 |

Analyse

Le rapport généré par la machine à mesurer tridimensionnelle présente les mesures des dimensions d'une sphère effectuées à l'aide d'un palpeur et d'un scanner. Malheureusement, les résultats révèlent que les dimensions mesurées de la sphère se situent en dehors de la plage de tolérance spécifiée et ne correspondent pas aux dimensions nominales requises.

IV.5.5 Mesure un polygone

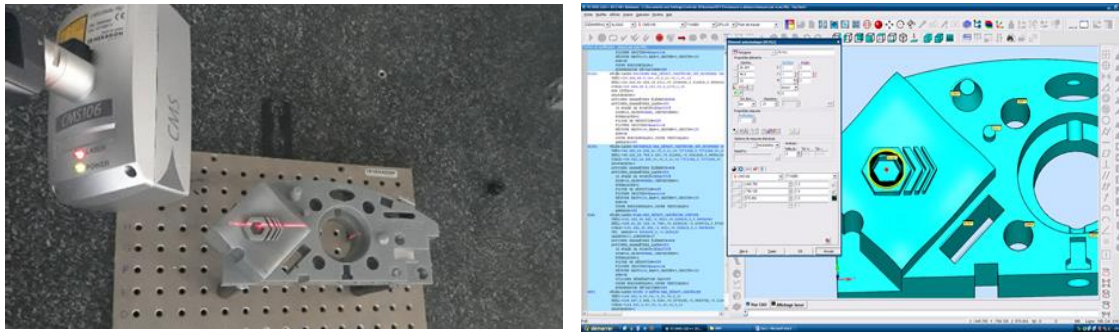


Figure IV.11 : Mesure d'une polygone 3D mesuré.

Rapport d'un polygone (Mesure par contact)

| ⊕ | MM | N°18 - PLYG1 | | | | |
|----|-----------|--------------|--------|--------|-------|--------------|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 13.000 | 0.200 | -0.200 | 13.010 | 0.010 | 0.000 |

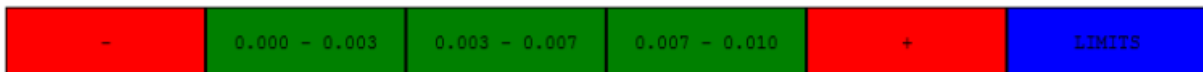
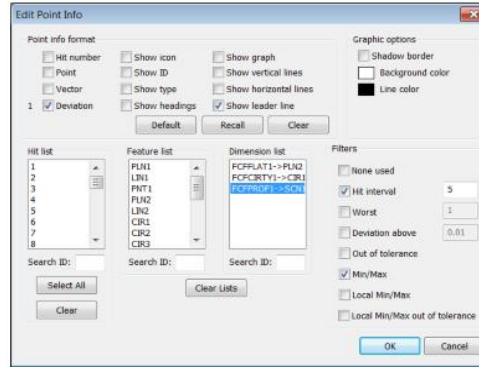
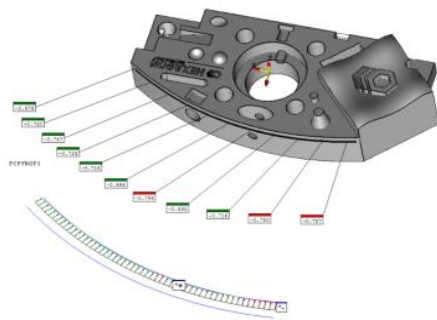
Rapport d'un polygone (Mesure à distance)

| ⊕ | MM | N°05 - PLYG1 | | | | |
|----|-----------|--------------|--------|---------|-------|--------------|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| X | -97.636 | 0.200 | -0.200 | -97.451 | 0.185 | 0.000 |
| Y | -0.500 | 0.200 | -0.200 | 0.339 | 0.839 | 0.639 |
| Z | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 15.201 | 0.201 | 0.001 |
| D | 13.000 | 0.200 | -0.200 | 13.259 | 0.259 | 0.059 |

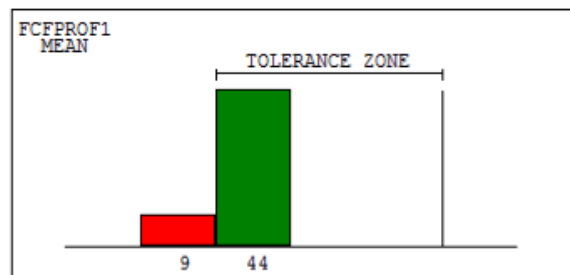
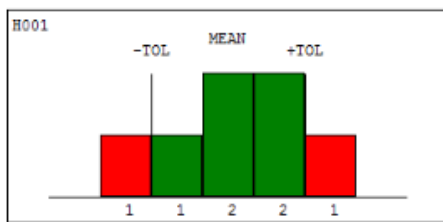
Analyse

Selon les conclusions du rapport, les dimensions mesurées à l'aide du palpeur sont en accord avec les dimensions nominales, démontrant ainsi la précision de cette méthode de mesure.

Cependant, lors de l'utilisation du scanner, les dimensions mesurées se sont révélées inacceptables et ne correspondent pas aux dimensions nominales. Il est possible que cette légère différence de mesure entre les deux méthodes en soit la cause.



L'histogramme des cotes permet à l'utilisateur d'afficher un diagramme à barres du nombre des écarts avec une tolérance zéro. Ajoutez l'histogramme au rapport puis faites glisser la cote correspondante dans l'histogramme.



Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé un protocole métrologique pour l'analyse des spécifications géométriques des pièces mécaniques. Pour illustrer l'efficacité de ce protocole, nous avons réalisé une étude de cas approfondie sur une pièce modèle spécialement conçue. Cette pièce modèle a été soigneusement conçue pour contenir une variété de formes géométriques couramment rencontrées dans le domaine de la métrologie.

Nous avons sélectionné cette pièce modèle car elle englobe presque toutes les formes géométriques nécessaires à une analyse approfondie. Elle présente des caractéristiques telles que des trous de différents diamètres, des surfaces planes, des profils complexes, des arêtes vives, des chanfreins, des formes cylindriques, des surfaces courbes, etc. Ainsi, la planéité, la perpendicularité, la circularité, la cylindricité, la coaxialité et la concentricité ont été mesurés et analysés.

Tout au long de l'étude de cas, nous avons suivi les étapes du protocole métrologique, y compris la préparation de la pièce, l'utilisation des instruments de mesure appropriés (MMT),

Chapitre IV : ETUDE DE CAS INSPECTION D'UNE PIECE MODELE SUR MMT

l'acquisition de données précises, le traitement des données, l'analyse des résultats et l'évaluation de la conformité aux spécifications requises.

Les résultats obtenus à partir de cette étude de cas ont démontré l'efficacité et l'exactitude du protocole métrologique développé. Les mesures et les analyses réalisées sur la pièce modèle ont fourni des informations détaillées sur les spécifications géométriques, telles que les dimensions, les formes, les tolérances, les écarts, etc.

En résumé, cette étude de cas sur une pièce modèle représentative a permis de mettre en évidence l'application pratique et la fiabilité du protocole métrologique développé pour l'analyse précise des spécifications géométriques des pièces mécaniques.

Conclusion générale

Le développement d'un protocole métrologique sur une machine de mesure tridimensionnelle (MMT) pour l'analyse des spécifications géométriques des pièces mécaniques revêt une importance cruciale pour garantir la qualité et la conformité des pièces fabriquées. Ce protocole métrologique permet une mesure précise des dimensions et des formes des pièces, ainsi qu'une évaluation rigoureuse de leur précision et de leur fiabilité.

La mise en place de ce protocole nécessite plusieurs étapes clés. Tout d'abord, il est essentiel de définir les spécifications géométriques pertinentes pour les pièces mécaniques concernées, en prenant en compte des paramètres tels que la rectitude, la planéité, la circularité, la cylindricité, la perpendicularité, etc. Une connaissance approfondie des normes et des tolérances géométriques est primordiale à cette étape.

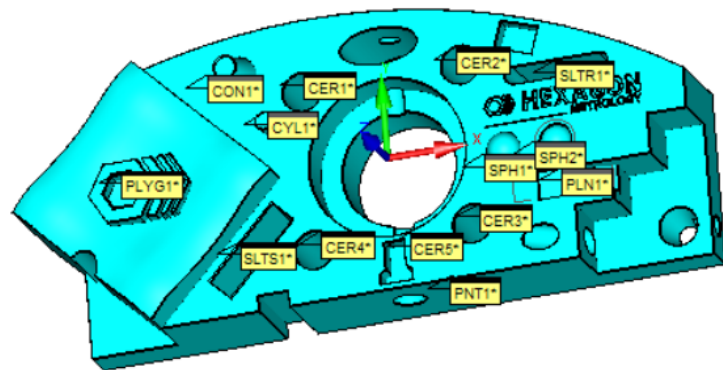
Ensuite, il est crucial de choisir les méthodes de mesure appropriées sur la MMT. Cela implique l'utilisation de capteurs et d'outils de mesure adaptés aux caractéristiques spécifiques de chaque pièce. Il est également nécessaire de déterminer les séquences de mesure optimales et les positions de palpation afin d'obtenir des résultats précis et reproductibles.

Une fois les mesures effectuées, il est indispensable de traiter et d'analyser les données obtenues. Cela peut nécessiter l'utilisation de logiciels spécialisés pour calculer les écarts par rapport aux spécifications, générer des rapports de mesure détaillés et effectuer des analyses statistiques afin d'évaluer la capacité de processus et la performance de la MMT.

En somme, l'établissement d'un protocole métrologique rigoureux sur une machine de mesure tridimensionnelle revêt une importance capitale pour assurer la qualité des pièces mécaniques. Il permet de garantir des mesures précises, une évaluation objective des spécifications géométriques et une amélioration continue des processus de fabrication. En investissant dans le développement de ces protocoles, les entreprises peuvent renforcer leur compétitivité sur le marché en offrant des produits fiables et conformes aux exigences les plus strictes.

Annexe

Rapport mesure à distance



| ⊕ | MM | N°01 - CER5 | | | | | |
|----|-----------|---------------|--------|---------|--------|--------------|--|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | |
| D | 60.500 | 0.200 | -0.200 | 60.500 | 0.000 | 0.000 | |
| ⊕ | MM | N°03 - CON1 | | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | |
| X | -55.000 | 0.200 | -0.200 | -55.298 | -0.298 | 0.098 | |
| Y | 40.000 | 0.200 | -0.200 | 40.554 | 0.554 | 0.354 | |
| Z | 13.995 | 0.200 | -0.200 | 13.998 | 0.003 | 0.000 | |
| A | 30.000 | 0.010 | -0.010 | 30.000 | 0.000 | 0.000 | |
| L | 13.995 | 0.200 | -0.200 | 13.995 | 0.000 | 0.000 | |
| ⊕ | MM | N°02-1 - CER1 | | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | |
| D | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 14.947 | -0.053 | 0.000 | |
| ⊕ | MM | N°02-2 - CER2 | | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | |
| D | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 14.976 | -0.024 | 0.000 | |

| ⊕ | MM | N°02-2 - CER2 | | | | | |
|----|-----------|---------------|--------|--------|--------|--------------|--|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | |
| D | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 14.976 | -0.024 | 0.000 | |
| ⊕ | MM | N°02-3 - CER3 | | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | |
| D | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 14.978 | -0.022 | 0.000 | |
| ⊕ | MM | N°02-4 - CER4 | | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | |
| D | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 14.999 | -0.001 | 0.000 | |

| ⊕ | MM | N°04 - CYL1 | | | | | |
|----|-----------|-------------|--------|---------|--------|--------------|--|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | |
| X | -44.180 | 0.200 | -0.200 | -42.775 | 1.405 | 1.205 | |
| Y | 19.948 | 0.200 | -0.200 | 23.178 | 3.230 | 3.030 | |
| D | 6.350 | 0.200 | -0.200 | 0.057 | -6.293 | 6.093 | |
| H | -6.350 | 0.200 | -0.200 | -6.350 | 0.000 | 0.000 | |

| ⊕ | MM | N°05 - PLYG1 | | | | | |
|----|-----------|--------------|--------|---------|-------|--------------|--|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | |
| X | -97.636 | 0.200 | -0.200 | -97.451 | 0.185 | 0.000 | |
| Y | -0.500 | 0.200 | -0.200 | 0.339 | 0.839 | 0.639 | |
| Z | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 15.201 | 0.201 | 0.001 | |
| D | 13.000 | 0.200 | -0.200 | 13.259 | 0.259 | 0.059 | |

| ⊕ | MM | N°06 - SLTS1 | | | | | |
|----|-----------|--------------|--------|---------|--------|--------------|--|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | |
| X | -54.308 | 0.200 | -0.200 | -54.778 | -0.469 | 0.269 | |
| Y | -26.665 | 0.200 | -0.200 | -26.211 | 0.454 | 0.254 | |
| Z | 0.000 | 0.200 | -0.200 | 0.430 | 0.430 | 0.230 | |
| D | 11.000 | 0.200 | -0.200 | 10.922 | -0.078 | 0.000 | |
| L | 37.000 | 0.200 | -0.200 | 36.946 | -0.054 | 0.000 | |

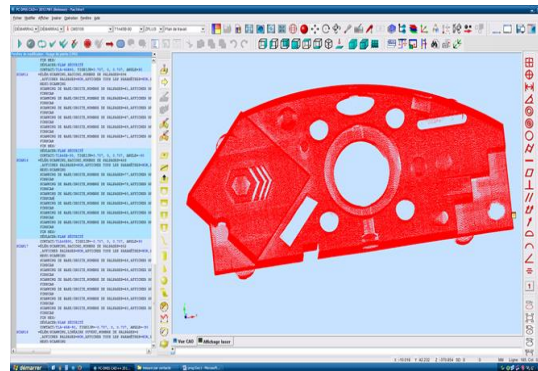
| ⊕ | MM | N°07 - SLTR1 | | | | | |
|----|-----------|--------------|--------|--------|--------|--------------|--|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | |
| X | 67.000 | 0.200 | -0.200 | 66.726 | -0.274 | 0.074 | |
| Y | 23.000 | 0.200 | -0.200 | 22.906 | -0.094 | 0.000 | |
| Z | 0.000 | 0.200 | -0.200 | -0.466 | -0.466 | 0.266 | |
| D | 7.000 | 0.200 | -0.200 | 7.073 | 0.073 | 0.000 | |
| L | 40.000 | 0.200 | -0.200 | 39.792 | -0.208 | 0.008 | |

| ⊕ | MM | N°08 - SPH1 | | | | | |
|----|-----------|-------------|--------|--------|--------|--------------|--|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | |
| X | 44.500 | 0.200 | -0.200 | 44.367 | -0.133 | 0.000 | |
| Y | -4.340 | 0.200 | -0.200 | -4.347 | -0.007 | 0.000 | |
| Z | 0.000 | 0.200 | -0.200 | -1.947 | -1.947 | 1.747 | |
| D | 12.700 | 0.200 | -0.200 | 15.285 | 2.585 | 2.385 | |

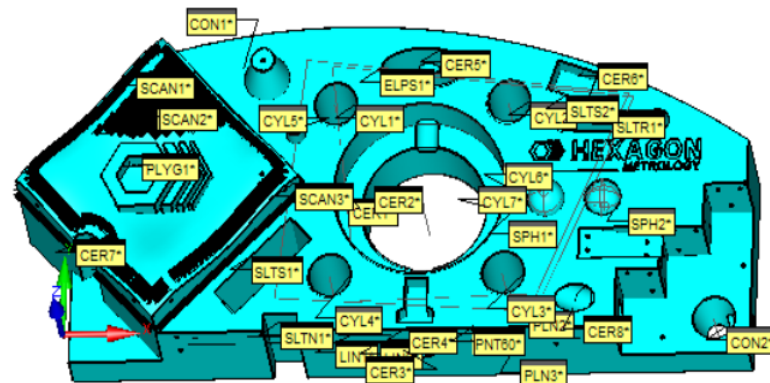
| ⊕ | MM | N°09 - SPH2 | | | | | |
|----|-----------|-------------|--------|--------|--------|--------------|--|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | |
| X | 64.500 | 0.200 | -0.200 | 64.488 | -0.012 | 0.000 | |
| Y | -4.340 | 0.200 | -0.200 | -4.315 | 0.025 | 0.000 | |
| Z | 0.000 | 0.200 | -0.200 | 1.324 | 1.324 | 1.124 | |
| D | 12.700 | 0.200 | -0.200 | 15.243 | 2.543 | 2.343 | |

Nuage de points globale

Utiliser un nuage de points pour rétro conception



Rapport mesure par contact :



| ⊕ | MM | N°04-1 - CYL1 | | | | |
|----|-----------|---------------|--------|--------|-------|----------|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 15.429 | 0.429 | 0.229 |
| ⊕ | MM | N°04-2 - CYL2 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 15.412 | 0.412 | 0.212 |
| ⊕ | MM | N°04-3 - CYL3 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 15.384 | 0.384 | 0.184 |
| ⊕ | MM | N°04-4 - CYL4 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 15.405 | 0.405 | 0.205 |

| ⊕ | MM | N°04-1 - CYL1 | | | | |
|----|-----------|---------------|--------|--------|-------|--------------|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 15.429 | 0.429 | 0.229 |
| ⊕ | MM | N°04-2 - CYL2 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 15.412 | 0.412 | 0.212 |
| ⊕ | MM | N°04-3 - CYL3 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 15.384 | 0.384 | 0.184 |
| ⊕ | MM | N°04-4 - CYL4 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 15.405 | 0.405 | 0.205 |

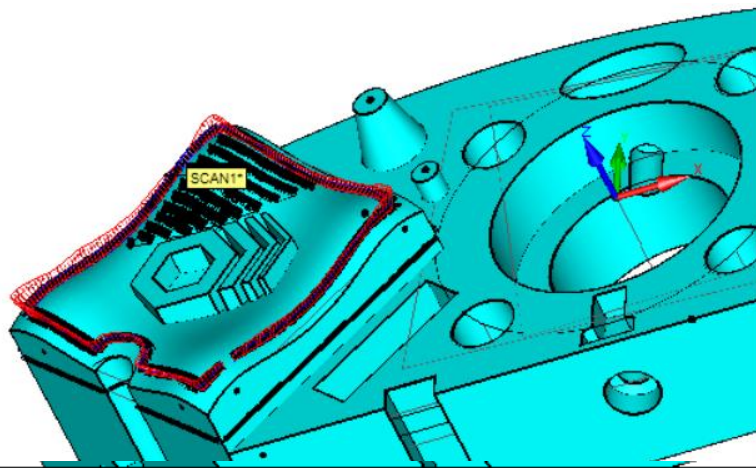
| ⊕ | MM | N°01 - CYL6 | | | | |
|----|-----------|---------------|--------|--------|--------|--------------|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 60.500 | 0.200 | -0.200 | 60.783 | 0.283 | 0.083 |
| ⊕ | MM | N°02 - CYL7 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 44.000 | 0.200 | -0.100 | 44.188 | 0.188 | 0.000 |
| ⊕ | MM | N°03 - CYL5 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 6.350 | 0.200 | -0.200 | 6.167 | -0.183 | 0.000 |
| ⊕ | MM | N°04 - CON1 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| A | 30.000 | 0.200 | -0.200 | 29.793 | -0.207 | 0.007 |
| L | 13.995 | 0.200 | -0.200 | 14.148 | 0.153 | 0.000 |
| ⊕ | MM | N°04-1 - CYL1 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 15.429 | 0.429 | 0.229 |
| ⊕ | MM | N°04-2 - CYL2 | | | | |

| ⊕ | MM | N°05 - CYL3 | | | | |
|----|-----------|--------------|--------|---------|--------|--------------|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 15.384 | 0.384 | 0.184 |
| ⊕ | MM | N°06 - CYL4 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 15.000 | 0.200 | -0.200 | 15.405 | 0.405 | 0.205 |
| ⊕ | MM | N°07 - SPH1 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 12.700 | 0.200 | -0.200 | 12.408 | -0.292 | 0.092 |
| ⊕ | MM | N°08 - SPH2 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 12.700 | 0.200 | -0.200 | 12.820 | 0.120 | 0.000 |
| ⊕ | MM | N°09 - CER8 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 10.000 | 0.200 | -0.200 | 9.985 | -0.015 | 0.000 |
| ⊕ | MM | N°10 - CER2 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 44.000 | 0.200 | -0.200 | 44.131 | 0.131 | 0.000 |
| ⊕ | MM | N°11 - CER3 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 12.700 | 0.200 | -0.200 | 12.879 | 0.179 | 0.000 |
| ⊕ | MM | N°12 - CER5 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 8.000 | 0.200 | -0.200 | 7.965 | -0.035 | 0.000 |
| ⊕ | MM | N°13 - CON2 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| A | 30.000 | 0.200 | -0.200 | 29.846 | -0.154 | 0.000 |
| L | -13.000 | 0.200 | -0.200 | -13.079 | -0.079 | 0.000 |
| ⊕ | MM | N°14 - SLTR1 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 7.000 | 0.200 | -0.200 | 7.314 | 0.314 | 0.114 |
| L | 40.000 | 0.200 | -0.200 | 40.195 | 0.195 | 0.000 |
| ⊕ | MM | N°14 - SLTR1 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 7.000 | 0.200 | -0.200 | 7.314 | 0.314 | 0.114 |
| L | 40.000 | 0.200 | -0.200 | 40.195 | 0.195 | 0.000 |
| ⊕ | MM | N°15 - SLTS1 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 11.000 | 0.200 | -0.200 | 10.983 | -0.017 | 0.000 |
| L | 37.000 | 0.200 | -0.200 | 36.996 | -0.004 | 0.000 |
| ⊕ | MM | N°17 - SLTS2 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 10.785 | 0.200 | -0.200 | 11.028 | 0.243 | 0.043 |
| L | 15.070 | 0.200 | -0.200 | 15.191 | 0.121 | 0.000 |

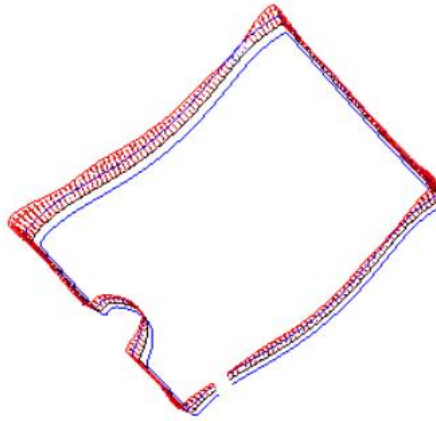
| | | | | | | | |
|----------------|-----------|-------------|-------|-------|-------|----------|-------|
| FCFPARL1 | MM | // Ø0.2 G | | | | | |
| Élément | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | BONUS |
| LIN3 | 0.000 | 0.200 | 0.000 | 0.075 | 0.075 | 0.000 | 0.000 |
| FCFCONCEN 1 | MM | ⊙ Ø0.2 C | | | | | |
| Élément | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | BONUS |
| CER9 | 0.000 | 0.200 | | 0.662 | 0.662 | 0.462 | |
| FCFPERP1 | MM | ⊥ Ø0.2 A | | | | | |
| Élément | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | BONUS |
| CYL6 | 0.000 | 0.200 | 0.000 | 0.019 | 0.019 | 0.000 | 0.000 |
| FCFCOAX1 | MM | ⊕ Ø0.2 C | | | | | |
| Élément | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | BONUS |
| CYL7 | 0.000 | 0.200 | | 0.667 | 0.667 | 0.467 | |
| FCFCIRTÉ1 | MM | ○ 0.2 | | | | | |
| Élément | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | BONUS |
| CER2 | 0.000 | 0.200 | | 0.135 | 0.135 | 0.000 | |

| | | | | | | |
|----|-----------|-------------|--------|--------|--------|--------------|
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 44.000 | 0.200 | -0.100 | 44.188 | 0.188 | 0.000 |
| ⊕ | MM | N°03 - CYL5 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| D | 6.350 | 0.200 | -0.200 | 6.167 | -0.183 | 0.000 |
| ⊕ | MM | N°04 - CON1 | | | | |
| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
| A | 30.000 | 0.200 | -0.200 | 29.793 | -0.207 | 0.007 |
| L | 13.995 | 0.200 | -0.200 | 14.148 | 0.153 | 0.000 |

| | | | | | | | |
|--|-----------|--------------------|---------|-------|-------|----------|-------|
| FCFLOC2 Position | MM | ⊕ Ø0.2 A C B | | | | | |
| Élément | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL | BONUS |
| CON1 | 0.000 | 0.200 | | 0.163 | 0.163 | 0.000 | 0.000 |
| FCFLOC2 Résumé ADAPTER AUX RÉFÉRENCES=ON, DÉVIATION PERPENDICULAIRE À LA LIGNE CENTRALE=ON | | | | | | | |
| Élément | AX | VAL. NOM. | MESU | DÉV | | | |
| CON1 (PT DE DÉPART) | X | -55.000 | -54.919 | 0.081 | | | |
| | Y | 40.000 | 40.001 | 0.001 | | | |



| AX | VAL. NOM. | +TOL | -TOL | MESU | DÉV | HORS TOL |
|----|-----------|-------|--------|-------|-------|--------------|
| M | 0.000 | 0.200 | -0.200 | 0.660 | 0.660 | 0.460 |



Bibliographie

- [1] : Abdelhalim Yettou, METHODOLOGIE DE CONVERSION DES SPECIFICATIONS GEOMETRIQUES DE TOLERANCE EN ZONES D'INCERTITUDE, Sherbrooke (Québec), Canada, 2011.
- [2] : FLAVIO PRIETO, MÉTROLOGIE ASSISTÉE PAR ORDINATEUR : APPORT DES CAPTEURS 3D SANS CONTACT, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, MONTRÉAL, JANVIER 2000
- [3] : http://www.zpag.net/Tecnologies_Industrielles/Tolerances_Geometriques.htm.
- [4] : Ammari Yassine, Senoussaoui Yahia, Etude et analyse de la rugosité de surface de l'acier AISI 1060 pendant le fraisage en utilisant la méthode de surfaces de réponse, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, (2017 /2018), p (16,17,18,19).
- [5] : André chevalier, guide du dessinateur industriel, paris, hachette technique, 2004, p (67,71).
- [6]: <https://www.keyence.fr/ss/products/measure-sys/gd-and-t/>, Copyright (C) 2023 KEYENCE CORPORATION. All Rights Reserved.
- [7]: Hexagonmetrology.PC-DMISManueldeFormationNiveauI, France, V2014.
- [8]: Hexagonmetrology.PC-DMISManueldeFormationNiveauII, France, V2012.
- [9] : Hexagonmetrology.PC-DMISManueldeFormationNiveauI, France, V2016.
- [10] : Hexagon metrology. MANUEL D'UTILISATION. M1S331FC_H. Juin 2005
- [11]: Diao F. ElKott. A Thesis Submitted to the Faculty of Graduate Studies and Research through the Program of Industrial and Manufacturing Systems Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Applied Science at the University of Windsor. Windsor, Ontario, Canada. 2001.
- [12]:<https://www.wasyresearch.com/general-procedures-to-operate-a-tactile-coordinate-measuring-machine-tactile-cmm/>
- [13] : Hexagon metrology. Utilisation et maintenance du système de mesure. M1U902FC_ avril 2010.

[14]: A Thesis in Industrial and Manufacturing Engineering. AUTOMATED INSPECTION PLANNING FOR COORDINATE MEASURING MACHINES: FEATURE ACCESSIBILITY AND WORKPIECE ORIENTATION ANALYSIS. The Pennsylvania State University the Graduate School College of Engineering. May 1996.

[15]: Target market / application demo. Mathieu SELVA / Marco FORNERIS. CMS106 sales training session. 12-13 July 2010.

[16] : S. Sadaoui, Ch. Mehdi-Souzani, C. Lartigue. Une approche d'inspection 3D automatique combinant capteur laser et palpeur. LURPA, ENS Cachan, Univ. Paris-Sud, Université Paris 13, Sorbonne Paris Cité, Université Paris-Saclay, 94235 Cachan, France

[17]: Hocken, R.J., Raja, J., et Babu, U., (1993), « Sampling Issues in Coordinate Metrology », Manufacturing Review, Vol. 6, no 4, décembre, p. 282 à 294.

[18] : Menq, C.H., Yau, H.T., et Lai, G.Y., (1992), « Automated » Mesure de précision du profil de surface en CAO Inspection », IEEE Transactions on Robotics et Automation, vol. 8, no 2, avril, p. 268 à 278.

[19] : Connolly, C.I., (1985), « The Determination of Next Best Views », Actes de la conférence internationale de l'IEEE sur Robotique et automatisation, p. 432 à 435.

[20] : Hutchinson, S.A. et Kak, A.C., (1989), « Planning Sensing Stratégies dans une cellule de travail robotisée avec multi-capteurs Capabilities », IEEE Transactions on Robotics et Automation, vol. 5, no 6, décembre, p. 765 à 783.

[21] : Lakhdari Fouad, ÉTUDE DE L'ENDOMMAGEMENT DES SURFACES OPTIQUES PAR DES PARTICULES ABRASIVES, UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS – SÉTIF UFAS (ALGERIE), Mars 2010.

[22] : ABDELHAK NAFI, VÉRIFICATION ET DIAGNOSTIC DES MACHINES À MESURER TRIDIMENSIONNELLES AVEC DÉCOUPLAGE MACHINE ET PALPEUR, UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL, ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL, 2011

[23] : Hassina Gheribi, CONTRIBUTION A L'ESTIMATION DES INCERTITUDES DE MESURE DANS LA CHAÎNE DE TRAITEMENT D'UNE MACHINE A MESURER TRIDIMENSIONNELLE, UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE, 2018.

[24] : François HENNEBELLE, DETERMINATION DES INCERTITUDES DE MESURES SUR MACHINES A MESURER TRIDIMENSIONNELLES APPLICATION AUX ENGRENAGES, Français,2007.

[25]:<https://www.keyence.ca/ss/products/measure-sys/gd-and-t/measure/instrument.jsp>, Measuring Machines, KEYENCE Canada.

[26] : Cowan, C.K. et Kovesi, P.D., (1988), « Automatic Sensor Placement à partir des exigences de la tâche de vision », IEEE Transactions sur l'analyse de modèles et la machine Intelligence, vol. 10, no 3, mai, p. 407-416.

[27] : Mr MANGOUCI Ahmed, Exploration des moyens d'association de surfaces aux points palpés sur machine à mesurer tridimensionnelle, UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAÏD – TLEMCCEN, Année universitaire 2004 – 2005.

[28] : Fukada, M. et Shimokohbe, A., (1984), « Algorithms for Form évaluation, méthodes de zone minimale et de moindres carrés », Actes du Symposium international de métrologie for Qualité Production, Tokyo, p. 197 à 202.

[29] : Brown, C.W., (1992), « Dimensionnel Inspection Techniques for Technologie de mesure du point d'échantillonnage, » Précision Engineering, vol. 14, no 2, avril, p. 110 à 111.

[30] : Hart, P.E., Nillson, N.J., et Rafael, B., (1968), « A Formal Base de détermination heuristique du coût minimum Chemins », IEEE Trans. Systems, Man Cybernetics, MSSC-4, Vol. 2, p. 100 à 107, juillet.

[31] : Beckwith, W.A. et Parsons, F.G., (1994), « Measurement Méthodes et nouvelle norme B89.3.2 », Fabrication Revue, vol. 7, no 1, mars, p. 24 à 28.