

UNIVERSITÉ CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



ECOLE DOCTORALE PHYSIQUE CHIMIE SCIENCES
DE LA TERRE DE L'UNIVERS ET DE L'INGENIEUR
ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE(ESP)

Année : 2018 N° d'ordre :

THESE DE DOCTORAT UNIQUE

Spécialité : **Systemes Energétiques et environnement**

Présentée par :

MAHAMAT Charfadine Nimane

**Titre : Développement d'un outil d'aide aux Calculs des Incertitudes de
Mesures des Processus de Contrôle Tridimensionnel**

Soutenue le 05/02/2018 devant le jury composé de :

Président :

Aboubaker Cheidikh BEYE

Professeur Titulaire FST-UCAD

Rapporteurs :

Bassirou BA

Professeur Titulaire FST-UCAD

Jean-Yves CHAMPAGNE

Professeur Titulaire INSA- Lyon/France

Examineur :

Vincent SAMBOU

Maître de Conférences ESP-UCAD

Directeurs de thèse :

Youssouf MANDIANG

Professeur Titulaire ESP-UCAD

Stéphane RAYNAUD

Professeur Agrégé INSA- Lyon/France

Dédicaces

A mes parents et frères qui ne sont plus de ce monde aujourd'hui : CHARFADINE Nimane, FATIME Arim. YACOUB Charfadine et OUMAR Charfadine.

A mon épouse ZENABA Borgou Hassan

A mon fils ANAS Mahamat Charfadine

Remerciements

La présente étude n'aurait pas été possible sans le bienveillant soutien de certaines personnes. Et je ne suis pas non plus capable de dire dans les mots qui conviennent, le rôle qu'elles ont pu jouer à mes côtés pour en arriver là. Cependant, je voudrais les prier d'accueillir ici tous mes sentiments de gratitude qui viennent du fond de mon cœur, en acceptant mes remerciements.

Avant tout je remercie ALLAH le tout puissant pour m'avoir donné la force et le courage pour mener mes études.

Mes sincères remerciements vont d'abord à mon directeur de thèse, Youssouf MANDIANG (professeur titulaire), pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail doctoral, sa disponibilité, ses nombreux précieux conseils et son soutien constant avec sagesse, ses encouragements tout au long de ma thèse. Un homme posé et calme. Merci MANDIANG.

A cet égard, je remercie très sincèrement mon co-directeur de thèse Stéphane RAYNAUD (professeur agrégé, directeur du Centre Technique de l'innovation MECA3D, MIP2-Métrologie-Numérisation de INSA de Lyon) pour son accueil au sein du laboratoire de MIP2-Métrologie. Pour son encadrement, ses nombreux conseils et son soutien constant tout au long de ma thèse, malgré ses multiples responsabilités et occupations. Il m'a donné totale confiance durant tout le long de ce travail. Il était toujours à mes côtés dans toutes les situations que j'ai traversées durant ces années. Un homme d'une gentillesse exemplaire. Sa capacité d'analyse et son enthousiasme m'ont montré que le monde de la recherche pouvait être un univers passionnant. Merci Stéphane.

Je remercie toute l'équipe du Laboratoire d'Energétique Appliqué (LEA), de l'Ecole Supérieure Polytechnique (ESP) de Dakar.

Je tiens à remercier sincèrement toute l'équipe du Centre Technique de l'innovation MECA3D, MIP2- Métrologie-Numérisation de INSA de Lyon, Adrien CHOUVIER, Pascal ROUX, Thomas Bellot CHAMPIGNON, pour leur accueil chaleureux durant ces années et leur aide dans la réalisation des expérimentations, de cette étude et aussi pour la bonne ambiance de travail, leur sympathie. Je remercie spécialement Adrien CHOUVIER pour ses multiples soutiens et son aide dans les expérimentations de ce travail, et Saïd MABCHOUR, pour la fabrication des pièces expérimentales pour ce travail. J'ai eu la chance de travailler avec une équipe cosmopolite, avec des gens qui prennent de plaisir du travail. Je leur souhaite de l'accomplissement de la mise en place dans le laboratoire la méthode de 5S, que nous avons commencée. Merci et bon courage.

Dédicaces & Remerciements

J'aimerais souhaiter à Stéphane RAYNAUD et Saïd MABCHOUR, bonne continuation pour leur habitude de travail important et pour la réalisation de réunions en voiture sur le chemin de retour malgré les heures tardives.

J'exprime ma gratitude à Jean-Yves CHAMPAGNE, qui m'a toujours aidé pour mes séjours à INSA de Lyon. Merci Jean-Yves.

J'adresse mes sincères remerciements à toute l'équipe de la direction des relations internationales de INSA de Lyon, en particulier Valérie LEBYE, elle m'a toujours accueilli chaleureusement, et facilité mes prises en charge. J'ai senti d'elle un soutien moral sans pareil et inoubliable, lors du décès de mon père, et pendant mon opération.

J'adresse mes sincères remerciements et reconnaissance à M. Aboubaker Cheidikh BEYE, (Professeur Titulaire des Universités de Classe Exceptionnelle, directeur de l'école doctorale de l'université de N'djamena) pour avoir accepté avec plaisir de présider le jury de cette thèse, malgré ses responsabilités et occupations.

Je remercie également très sincèrement M. Bassirou BA (Professeur Titulaire, directeur de l'école Doctorale Physique-Chimie-Sciences de la Terre-de l'Univers et de l'Ingénieur (PCSTUI), de l'Université Cheikh Anta Diop (UCAD) de Dakar). Pour avoir bien voulu donner de son temps à ce travail en acceptant la fonction de rapporteur, et apporté ses précieuses observations.

Je tiens à remercier mes vifs remerciements à M. Jean-Yves CHAMPAGNE (Professeur Titulaire des universités, directeur du laboratoire de mécanique de fluide de l'INSA de Lyon), pour avoir accepté dans ce jury en qualité de rapporteur, en y apportant ses observations bénéfiques.

Je remercie également M Vincent SAMBOU (Maître de conférences, responsable de la formation doctorale, systèmes énergétiques et environnement de l'école Supérieure polytechnique de Dakar), pour avoir accepté d'être examinateur dans ce jury, en y examinant rigoureusement cette thèse.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance et mes sincères remerciements mes frères et amis, M. Abdoulaye CHAÏBO, et M. Hosky Youssouf TAGUIBO.

Je remercie tous ceux qui m'ont donné leur contribution d'une manière ou autre.

Enfin mes derniers remerciements, certes les mots les plus simples étant les plus forts, j'adresse toute mon affection à ma famille, en particulier à mon épouse ZENABA Borgou Hassan, malgré mon éloignement, qui m'a soutenu avec intelligence, tendresse, amour tous les jours, dans toutes les situations, à mon fils ANAS, je ne saurai jamais combien je lui ai manqué. Merci mes amours j'en suis reconnaissant.

Une pensée pour terminer ces remerciements pour mon père qui n'a pas vu l'aboutissement de ce travail.

RESUME

En métrologie dimensionnelle, les machines à mesurer tridimensionnelles se sont largement répandues, dans les laboratoires de recherche en métrologie et dans les ateliers. Les logiciels associés à ces machines ont grandement progressé. Très peu de calculs d'incertitudes ou de la capacité sont aujourd'hui effectués selon les règles de l'art dans les milieux industriels et scientifiques.

Cette étude de développement d'un outil d'aide aux calculs des incertitudes de mesures des processus de contrôle tridimensionnel devra se faire à partir de plusieurs types mesures 3D et essais:

- la réalisation des mesures physiques d'une pièce étalon (test) sur deux types de machines à mesurer tridimensionnelles (MMTs), manuelles et à commande numériques.
- une comparaison des moyens de mesure 3D. la réalisation de mesures virtuelles des pièces à l'aide des nuages des points par plusieurs logiciels de mesure 3D.
- la confirmation des facteurs d'influences dans les résultats de mesures 3D dus à la partie logicielle.
- la réalisation des mesures 3D de dix (10) pièces identiques sur deux MMTs à commande numérique a été réalisée.

A partir un certain nombre des paramètres de variation du système de mesure, un outil d'estimation des incertitudes des résultats de mesures ou de la capacité MMT CN a été développé. Les résultats sont satisfaisants par rapports aux objectifs de l'étude.

Les résultats de ces travaux de recherche, ont l'objet de deux publications dans des revues scientifiques, et une communication orale dans une conférence internationale.

Mots clés : Métrologie, incertitudes, machines à mesurer tridimensionnelles, facteurs d'influences, mesure 3D, pièces, mesures virtuelles, nuages de points, spécifications géométriques.

ABSTRACT

In dimensional metrology, coordinate measuring machines have spread widely in the metrology research laboratories and workshops. The software associated with these machines has made great progress. Very few calculations of uncertainties or capability are now carried out according to the rules of the art in industrial and scientific circles.

This study of development a tool to help calculations of measurement uncertainties in three-dimensional control processes.

- the realization of the physical measurements of a standard part (test) on two types of three-dimensional measuring machines (CMMs), manual and numerically controlled.
- a comparison of the 3D measurement means.
- the realization of virtual measurements of the pieces using the point clouds by several software of measurement 3D.
- the confirmation of the influencing factors in the results of 3D measurements due to the software part.
- the realization of 3D measurements of ten (10) identical parts on two CMMs with numerical control.

From a certain number of the parameters of variation of the measurement system, a tool of estimation of the uncertainties of the measurement results of the capability CMM NC was developed. The results are satisfactory in relation to the objectives of the study.

The results of this research are the subject of two publications in scientific journals, and a paper in an international conference.

Keywords : Metrology, uncertainties, coordinate measuring machines, Factors of influence, 3D measurement, parts, Virtual measures, clouds of points, geometric specification.

Chapitre 1

Généralités et Etat de l'Art

Sommaire

1.1	Introduction.....	5
1.2	Généralités.....	6
1.2.1	Métrologie.....	7
1.2.1.1	Mesurage.....	8
1.2.1.2	Mesurande.....	8
1.2.1.3	Notion d'incertitude de mesure.....	8
1.2.1.4	Identification des causes d'erreur et quantification des sources d'incertitudes.....	8
1.2.2	Machines à mesurer tridimensionnelles (MMT).....	9
1.2.3	La mesure 3D.....	11
1.2.4	La demande de la mesure 3D.....	12
1.2.5	Définition géométrique ISO GPS au contrôle 3D.....	13
1.2.6	Tolérancement géométrique (Tolérancement 3D).....	14
1.2.7	Le système de référence spécifié [14],.....	16
1.2.7.1	Élément de situation.....	16
1.2.7.2	Référence spécifiée réelle.....	16
1.2.7.3	Référence spécifiée.....	16
1.2.7.4	Référence spécifiée unique.....	16
1.2.7.5	Référence spécifiée commune.....	16
1.2.7.6	Section de référence spécifiée.....	16
1.2.7.7	Indicateur de référence spécifiée.....	16
1.2.7.8	Référence spécifiée primaire.....	16
1.2.7.9	Référence spécifiée secondaire.....	17
1.2.7.10	Référence spécifiée tertiaire.....	17
1.2.8	La zone de tolérance.....	18
1.2.9	Éléments tolérancés.....	19

Table des Matières

1.2.9.1	Exigence d'enveloppe	19
1.2.9.2	Maximum matière	19
1.2.9.3	Minimum matière	20
1.2.10	Principe d'indépendance	20
1.2.11	Concept de spécification géométrique des produits(GPS)	20
1.2.11.1	Objectifs	21
1.2.12	Normes ISO de Spécification Géométrique de Produits(GPS)	21
1.2.13	Les maillons	22
1.3	Etat de l'art	25
1.3.1	Travaux déjà effectués	25
1.4	Conclusion	32

Chapitre 2

Etude expérimentale de mesures 3D

Sommaire

2.1	Introduction	34
2.2	Choix de moyens de mesures	34
2.3	Etude préliminaire	35
2.3.1	Qualification du palpeur	35
2.3.2	Mesures tests sur une bague étalon	37
2.4	Réalisation de Mesures sur une pièce test	38
2.4.1	Gamme de mesure	38
2.4.2	Résultats de l'Etude préliminaire	41
2.5	Conclusion	41
2.6	Etude expérimentale de mesures physiques d'une pièce test (étalon)	41
2.6.1	Introduction	41
2.6.2	Méthodologie : mise en place de la gamme de contrôle	42
2.6.2.1	Procédure de mesures	42
2.6.2.2	Gamme de mesurage	42

Table des Matières

2.6.2.3	Evaluation des spécifications géométriques.....	44
2.6.2.4	Répétabilité et reproductibilité de mesures	45
2.6.3	Résultats de mesures	45
2.6.3.1	Identification des principales sources d'incertitudes.....	46
2.6.3.2	Différence entre erreur de mesure et incertitudes sur la mesure	48
2.6.3.3	Résultats expérimentaux.....	49
2.6.3.4	Inter comparaison des résultats de mesures	51
2.7	Conclusion.....	54

Chapitre 3

Etude expérimentale « étalon logiciel » et « mesures virtuelles ».

Sommaire

3.1	Introduction.....	57
3.2	Objectifs.....	57
3.3	Présentation des pièces.....	57
3.4	Choix des logiciels.....	57
3.5	Critères d'association d'éléments géométriques.....	58
3.5.1	Le critère minimax, ou le critère de Tchebychev	58
3.5.2	La méthode de moindres carrés.....	58
3.6	Méthodologie.....	60
3.6.1	Procédure de mesure	60
3.6.2	Conversion du fichier des points au format logiciel.....	61
3.6.3	Identification des éléments de construction	62
3.6.4	Evaluation des Spécifications.....	63
3.6.5	Choix du critère d'association.....	63
3.7	Programme de mesure de pièces.....	64
3.8	Résultats de mesures du premier type de pièce.....	64
3.9	Conclusion.....	67

Table des Matières

3.10	Facteurs d'influences dans les résultats de mesures 3D : Logiciels associés aux machines à mesurer tridimensionnelles.....	68
3.10.1	Objectif.....	68
3.10.2	Etude expérimentale.....	68
3.10.3	Présentation du type de pièce.....	68
3.10.4	Programme de mesure.....	69
3.10.5	Résultats et Discussion.....	72
3.10.6	Proposition d'un diagramme de 5M de mesures virtuelles.....	77
3.10.7	Conclusion.....	77
3.10.8	Conclusion.....	78

Chapitre 4

Développement d'une méthodologie et d'un outil pragmatique d'estimation des incertitudes ou de la capabilité MMT.

Sommaire

4.1	Introduction.....	80
4.2	Méthodologie générale.....	80
4.3	Analyse de système de mesure (MSA)	80
4.3.1	Différence entre MSA et incertitude	82
4.4	Conclusion.....	83
4.5	Etude expérimentale.....	83
4.5.1	Présentation du type de pièces expérimentales	83
4.5.2	Mode opératoire de mesures.....	85
4.6	Mise en œuvre « MSA et test R et R ».....	87
4.6.1	Introduction	87
4.6.2	Paramètres d'estimation des incertitudes de mesures ou de la capabilité MMT.....	87
4.7	Estimation des incertitudes de mesure ou de la capabilité MMT.....	89
4.8	Résultats et Discussion.....	89

Table des Matières

4.9	Conclusion.....	100
-----	-----------------	-----

Chapitre 5

Conclusion Générale et Perspectives

Sommaire

5.1	Conclusion Générale	102
5.2	Perspectives.....	103

Liste des figures

Figure 1. 1 - MMT avec contact.....	6
Figure 1. 2 - MMT bras portable (a) et MMT fixe (b) équipées de deux technologies.....	7
Figure 1. 3 - Diagramme de 5M	9
Figure 1. 4 - Structure de principe d'une MMT [9].....	10
Figure 1. 5 - les moments clés de l'histoire de la mesure 3D [6]	11
Figure 1. 6 –Image 3D obtenue par palpation des points.....	13
Figure 1. 7 – Image obtenue par scanning.....	13
Figure 1. 8 - Modèle nominal et réel [15].....	14
Figure 1. 10 - Référence spécifiée commune.	17
Figure 1. 9 - Référence spécifiée simple.	17
Figure 1. 11 - Références spécifiées.....	17
Figure 1. 12 - Position de la section de référence spécifiée dans un élément de spécification [13]	18
Figure 1. 13 - exemple position de la section de référence spécifiée	18
Figure 1. 14 - Zone de tolérance.....	19
Figure 1. 15 - Illustration du maximum de matière [15]	20
Figure 1. 16 - Schéma comparatif des deux méthodes pour l'estimation des incertitudes de mesure, le GUM et son Supplément 1 sur la méthode de Monte Carlo. [33]	27
Figure 1. 17 – Gamme de mesure [34].....	28
Figure 1. 18 - Surface réelle et associée [34]	28
Figure 1. 19 - Algorithme proposé [38].....	29
Figure 1. 20 - Démarche de validation [28].....	30
Figure 1. 21 - Flux de données du calibre virtuel MMT [41].....	31
Figure 2. 1 -Thermomètre de vérification des variations de la température.....	35
Figure 2. 2 -Mesure d'un point au centre de la sphère étalon	36
Figure 2. 3 - Mesure de points aux côtés de la sphère étalon	36
Figure 2. 4 - Calibrage du palpeur à 45° et 90°.....	37
Figure 2. 5 - Montage de la bague sur le marbre et 3D du scan	38
Figure 2. 6 : Mode opératoire de mesures	39
Figure 2. 7 - Gamme de mesure	40
Figure 2. 8 - Représentation de l'association des éléments.....	40
Figure 2. 11 - Pièce étalon	43
Figure 2. 12 -CAO de la pièce expérimentale	44
Figure 2. 13 - Représentation en 3D des éléments associés	46
Figure 2. 14 - Diagramme de 5M, les principales sources d'incertitudes et facteurs d'influences	48

Liste des figures

Figure 2. 15- Illustration de la différence entre l'erreur de mesure et l'incertitude de mesure [46]	49
Figure 2. 16 - Distance (165 mm) entre deux points.....	51
Figure 2. 17 - Comparaison des résultats de mesures de l'angle, obtenus par les différents logiciels, et avec la valeur nominale.....	52
Figure 2. 18 - Cylindricité du cylindre de 54 mm évaluée par les différents logiciels.....	52
Figure 2. 19 - Comparaison de la circularité du cylindre de 54 mm	53
Figure 2. 20 - Comparaison de la planéité de la pièce étalon évaluée par les logiciels,.....	53
Figure 3. 1 -Plan minimax et Cylindre minimax [49]	58
Figure 3. 2 -Plan et Cercle des moindres carrés [49].....	60
Figure 3. 3 - Procédure de mesure.....	61
Figure 3. 4 -Type de fichier	62
Figure 3. 5 -Nuage des points (a), CAO 3D de la pièce à construire (b).....	62
Figure 3. 6 - Résultats de mesure de perpendicularité.....	65
Figure 3. 7 - Localisation de l'axe du cylindre 1	66
Figure 3. 8 - Localisation de l'axe du cylindre 2.....	66
Figure 3. 9 -Localisation de l'axe du cylindre 3.....	67
Figure 3. 10 – CAO de la pièce à construire	69
Figure 3. 11 –Conversion de points en nuage de points.....	71
Figure 3. 12 -Représentation l'association des éléments géométriques de la pièce du logiciel CMM Manager	73
Figure 3. 13 - Représentation l'association des éléments géométriques de la pièce du logiciel Metrolog XG 13	73
Figure 3. 14 - Planéité du plan A, obtenue de différents logiciels	74
Figure 3. 15 -Résultats de mesures diamètre du cylindre de 10 mm.....	74
Figure 3. 16 -Cylindricité évaluée	75
Figure 3. 17 -Circularité évaluée du cercle.....	75
Figure 3. 18 - Diagramme de 5M proposé de processus de mesures virtuelles	77
Figure 4. 1 - Processus de Mesure.....	81
Figure 4. 2 - Vue de coupe	83
Figure 4. 3 - CAO 3D de la pièce	83
Figure 4. 4 –Vue de face.....	84
Figure 4. 5 - Vue de derrière.....	84
Figure 4. 6 - Pièces expérimentales	84
Figure 4. 7 - Mode opératoire des mesures	85
Figure 4. 8 - Dégauchissage de la pièce	86
Figure 4. 9 - Exécution de gamme de mesures.....	87

Liste des figures

Figure 4. 10 - Modèle de saisie de résultats pour l'estimation des incertitudes ou de la capabilité MMT	90
Figure 4. 11 - Estimation des incertitudes-types et élargies de l'évaluation du parallélisme	91
Figure 4. 12 - Modèle de Rapport d'estimation de la Capabilité MMT	92
Figure 4. 13 - Graphes de capabilités estimées de spécifications par catégorie, MMT Zeiss	96
Figure 4. 14 - Graphes de capabilités estimées de spécifications par catégorie, MMT Nikon	99

Liste des tableaux

Tableau 2. 1 - Moyens de mesures	34
Tableau 2. 2- Estimation des écarts	41
Tableau 2. 3 - Estimation des écarts de résultats du logiciel Metrolog XG 06, associé à la machine Tri-mesure	49
Tableau 2. 4 - Estimation des écarts de résultats du logiciel Metrolog XG 13 associé à la machine Zeiss	50
Tableau 2. 5- Estimation des écarts de résultats du logiciel Cosmos 2.4, associé à la machine Mahr K-Mess	50
Tableau 2. 6 - Estimation des écarts de résultats du logiciel CMM Manager, associé à la machine LK Nikon	51
Tableau 3. 1 -Logiciels utilisés.....	57
Tableau 3. 2 - Spécifications et Valeurs nominales.....	71
Tableau 3. 3 -Ecart évalués par Metrolog XG 13	75
Tableau 3. 4 -Ecart évalués par CMM Manager	76
Tableau 3. 5 : Comparaison des écarts de deux logiciels	76
Tableau 4. 1 - Présentation d'une série des mesures	89
Tableau 4. 2 - Capabilité de la catégorie 3S_3M_10P	93
Tableau 4. 3 - Capabilité de la catégorie 3S_3M_5P	93
Tableau 4. 4 - Capabilité de la catégorie 2S_3M_5P	94
Tableau 4. 5 - Capabilité de la catégorie 2S_3M_5P	94
Tableau 4. 6 - Capabilité de la catégorie 2S_2M_3P	95
Tableau 4. 7 - Capabilité de 3S_3M_10P.....	97
Tableau 4. 8 - Capabilité de 3S_3M_5P.....	97
Tableau 4. 9 - Capabilité de la catégorie 2S_3M_5P	97
Tableau 4. 10 - Capabilité de 2S_2M_5P.....	98
Tableau 4. 11 - Capabilité MMT de 2S_2M_3P	98

Liste des symboles et abréviations

Symboles et Abréviations	Significations
∅	Diamètre
°C	Degrés Celsius
µm	Micromètre
3D	Tridimensionnel
3S_3M_10P	Trois séries trois mesures et 10 pièces
CAO	Conception assistée par ordinateur
CATIA	Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée
CE	Cercle
CMM	Coordinate meseaument machine
CN	Commande Numérique
Cyl	Cylindre
DR	Droite
EV	Equipement variation (MMT) pour notre cas
GPS	Spécifications géométriques de produits
mm	Millimètre
MMT	Machine à mesurer tridimensionnelle
MSA	Analyse de système de mesure
PL	Plan
PT	Point
Vp	Variation des pièces
R&R	Répétabilité et reproductibilité
TV	Variation totale
NF	Norme française
EN	Norme européenne
ISO	Organisation internationale de normalisation
GR	Gage Repeatability

Introduction

Les machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) se sont largement répandues, dans les laboratoires de recherche en métrologie et dans les ateliers. Les logiciels associés à ces machines ont grandement progressé, permettant de travailler à partir de définitions numériques des pièces à contrôler. Pour autant, il n'existe toujours pas d'étalon tridimensionnel, et la fiabilité de la mesure reste délicate à quantifier. L'application directe des règles établies dans le Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure [1], pour le traitement des résultats des mesures, paraît difficile, ne serait-ce que dans l'écriture du modèle.

Il existe une méthode ancienne, la méthode de Monte-Carlo, permettant à partir de la variation des termes de la matrice de compensation ; d'évaluer l'incertitude sur les points mesurés, puis sur les éléments construits sur ceux-ci. Néanmoins, cette méthode est très lourde et complexe à mettre en œuvre pour les calculs d'incertitudes de MMT.

Une autre approche, celle des comparaisons inter laboratoires, ou inter comparaisons, donne accès à une valeur d'incertitude sur un type de pièce, cette valeur étant ensuite extrapolée à l'ensemble des mesures effectuées. Cette méthode prend du temps, car elle monopolise les moyens le temps d'effectuer les mesurages requis pour l'inter comparaison. Mais elle permet de situer les performances de moyens de mesures (MMT en elle-même, ou utilisateur, ou méthode) des uns par rapport aux autres.

Ces différentes méthodes ne sont pas satisfaisantes pour une approche simple et pratique du calcul d'incertitude. Très peu de calculs d'incertitudes sont aujourd'hui effectués selon les règles de l'art dans les milieux industriels et scientifiques. Il semble important d'opter pour un outil d'aide aux calculs d'incertitudes, accessible à tous. Il est nécessaire aussi de répandre la notion d'incertitude auprès de tous les utilisateurs de MMT, tout en rappelant la nuance extraordinaire existant entre l'incertitude d'une mesure et l'erreur maximale tolérée d'un appareil.

Plusieurs travaux de recherches qui concernent les machines à mesurer tridimensionnelles ont été effectués, ils sont portés principalement sur les incertitudes de mesures de machines à mesurer tridimensionnelles ; mais sans différencier la partie machine et logicielle, alors que chacune ces parties pourrait avoir sa part d'influence dans les résultats de mesures.

La problématique posée par notre travail est axée sur la partie logicielle de moyens des mesures 3D. Dans un premier temps nous cherchons à vérifier la confirmation ou non de l'hypothèse de la contribution des incertitudes dans les résultats de mesure de la partie logicielle. Et par la suite nous développons un outil d'estimation des incertitudes de mesure ou de la capacité MMT.

Nous présentons ce travail comme suit :

Le Chapitre 1, est consacré à la généralité et état de l'art. Le chapitre 2, fait l'objet de l'étude expérimentale des mesures physiques (réelles) sur une pièce étalon. Le chapitre 3, couvre l'étude expérimentale de mesures virtuelles des pièces à l'aide des nuages des points, et le chapitre 4, fera l'objet de développement de la méthodologie et d'un outil d'estimation des incertitudes ou de la capacité MMT, par la mise en œuvre du MSA et test R&R.

Chapitre 1

Généralités et Etat de l'Art

Sommaire

1.1	Introduction.....	5
1.2	Généralités.....	6
1.2.1	Métrologie.....	7
1.2.1.1	Mesurage.....	8
1.2.1.2	Mesurande.....	8
1.2.1.3	Notion d'incertitude de mesure.....	8
1.2.1.4	Identification des causes d'erreur et quantification des sources d'incertitudes.....	8
1.2.2	Machines à mesurer tridimensionnelles (MMT).....	9
1.2.3	La mesure 3D.....	11
1.2.4	La demande de la mesure 3D.....	12
1.2.5	Définition géométrique ISO GPS au contrôle 3D.....	13
1.2.6	Tolérancement géométrique (Tolérancement 3D).....	14
1.2.7	Le système de référence spécifié [14],.....	16
1.2.7.1	Elément de situation.....	16
1.2.7.2	Référence spécifiée réelle.....	16
1.2.7.3	Référence spécifiée.....	16
1.2.7.4	Référence spécifiée unique.....	16
1.2.7.5	Référence spécifiée commune.....	16
1.2.7.6	Section de référence spécifiée.....	16
1.2.7.7	Indicateur de référence spécifiée.....	16
1.2.7.8	Référence spécifiée primaire.....	16
1.2.7.9	Référence spécifiée secondaire.....	17
1.2.7.10	Référence spécifiée tertiaire.....	17

1.2.8	La zone de tolérance.....	18
1.2.9	Eléments tolérancés.....	19
1.2.9.1	Exigence d'enveloppe.....	19
1.2.9.2	Maximum matière.....	19
1.2.9.3	Minimum matière.....	20
1.2.10	Principe d'indépendance.....	20
1.2.11	Concept de spécification géométrique des produits(GPS).....	20
1.2.11.1	Objectifs.....	21
1.2.12	Normes ISO de Spécification Géométrique de Produits(GPS).....	21
1.2.13	Les maillons.....	22
1.3	Etat de l'art.....	25
1.3.1	Travaux déjà effectués.....	25
1.4	Conclusion.....	32

1.1 Introduction

Ce premier chapitre, est consacré à la présentation des machines à mesurer tridimensionnelles et leur technologie dans un premier temps, puis il définit la métrologie et les vocabulaires de base employés dans ce domaine, et aussi la méthode d'indentification des sources des incertitudes de mesure.

Il fait aussi l'objet de présentation de l'historique de l'évolution de la mesure 3D, les secteurs où cette technologie est de plus en plus demandée.

Dans cette partie, sont définis également le tolérancement géométrique, le système des références des éléments géométriques, les objectifs du concept de normes ISO de spécifications géométriques de produits, la matrice de normes ISO, qui fait la correspondance des normes à chaque niveau de la matrice avec les caractéristiques géométriques.

La deuxième partie présentera un état de l'art, dans lequel sera faite une étude des travaux réalisés par d'autres études dans la même thématique de notre étude. Elle va permettre de mettre en évidence l'apport de cette recherche.

1.2 Généralités

Avec l'évolution de la technologie, les moyens de mesures 3D dans les laboratoires de métrologie et les ateliers de production se sont déployés ces dernières années permettant de faire des contrôles des objets très complexes, en réduisant le temps traditionnel de mesure avec des résultats beaucoup plus proche des valeurs vraies. Il y a deux technologies d'acquisition utilisées par les machines à mesurer tridimensionnelle :

- Les moyens de mesure sans contact avec laser pour le scan des objets (figure 1.2)
- D'autres utilisant un capteur pour la prise des points sur une surface (figure 1.1), moyens de mesure à contact généralement des machines fixes, mais il y a de plus en plus l'utilisation de bras de mesure portable ces dernières années.

Certaines machines de dernière génération sont équipées deux technologies suivant le type de pièces et de spécifications à contrôler.



Figure 1. 1 - MMT avec contact



Figure 1. 2 - MMT bras portable (a) et MMT fixe (b) équipées de deux technologies

1.2.1 Métrologie

Elle est définie par le vocabulaire international de métrologie-Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM), [2] étant comme « la Science des mesurages et ses applications ».

La métrologie définit les principes et les méthodes de processus de mesures, pour la garantie et le maintien de la confiance de résultats de mesures issus de ces processus.

Elle comprend tous les aspects théoriques et pratiques des mesurages, quels que soient l'incertitude de mesure et le domaine d'application.

1.2.1.1 Mesurage

D'après le vocabulaire international de métrologie-Concepts fondamentaux et généraux et termes associés [2], le mesurage est le « Processus consistant à obtenir expérimentalement une ou plusieurs valeurs que l'on peut raisonnablement attribuer à une grandeur ».

1.2.1.2 Mesurande

Selon le vocabulaire international de métrologie-Concepts fondamentaux et généraux et termes associés [2] est « la définition de la grandeur que l'on veut mesurer ».

1.2.1.3 Notion d'incertitude de mesure

L'incertitude de mesure, est un paramètre non négatif qui caractérise la dispersion des valeurs attribuées à un mesurande, à partir des informations utilisées. Dans la pratique habituelle de mesure avec les MMTs, des lignes directrices [3] d'estimation des incertitudes permettant aux métrologues de se familiariser avec les incertitudes sont décrites.

A chaque résultat de mesures est associé une incertitude-type. Un grand nombre des valeurs peuvent appartenir à un intervalle défini par les résultats de mesures, elles peuvent raisonnablement être attribuées au mesurande considéré.

1.2.1.4 Identification des causes d'erreur et quantification des sources d'incertitudes

Une mesure est toujours entachée d'erreur, même si on utilise un moyen de mesure de très bonne qualité. Les résultats de mesures peuvent être influencés par un certain nombre de paramètres, produisant des erreurs plus au moins raisonnables selon la procédure de mesure. Pour identifier les causes d'erreur, on utilise souvent la méthode des 5M (Moyens, Méthode, Milieu, Matière, Main d'œuvre) ou diagramme d'Ishikawa, est un outil qui permet d'identifier toutes les composantes d'incertitudes d'un processus de mesures. Parmi les causes d'erreurs identifiées par la méthode des 5M, les grandeurs influentes sont quantifiées selon les sources d'incertitudes. L'incertitude de mesure comprend différentes composantes, qui peuvent être évaluées par deux méthodes : Evaluation par la méthode type A ou la méthode B.

Méthode d'évaluation type A :

L'incertitude de mesure est évaluée à partir d'analyse statistique des séries d'observations, caractérisées par des écarts-types.

Méthode d'évaluation type B :

L'incertitude de mesure est évaluée par des procédés scientifiques sur des informations acquises ou sur l'expérience.

La figure 1.3 présente les sources d'incertitudes à l'aide d'un diagramme 5M. Plusieurs composantes peuvent être associées à chacune de ces sources. Nous allons les citer dans chapitre 2.

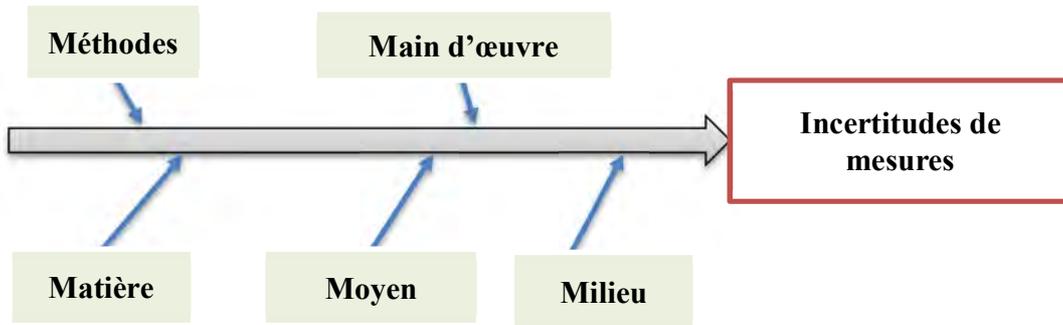


Figure 1.3 - Diagramme de 5M

Dans le cas de mesures sur MMT, la norme ISO 15530, dans sa partie 15530-3[4] définit les conditions de fonctionnement de MMT et les techniques de détermination des incertitudes de mesures. Elle définit aussi dans la partie 15530-4 [5] l'évaluation de l'incertitude de mesure spécifique d'une tâche, les exigences relatives aux logiciels d'évaluation des incertitudes, dans lesquelles sont déclarées les spécifications couvertes par le logiciel associé à la MMT.

En contrôle 3D, des machines à mesurer tridimensionnelles de plus en plus performantes sont utilisées, permettant de contrôler des spécifications très complexes des pièces mécaniques.

1.2.2 Machines à mesurer tridimensionnelles (MMT)

Les machines à mesurer tridimensionnelle, sont apparues dans les années 60, avec l'invention du palpeur à déclenchement en 1970 [6]. Ces nouvelles technologies se sont très vite développées et répandues dans les laboratoires de recherche et les ateliers. Aujourd'hui ces machines permettent de contrôler des pièces mécaniques de très petites tailles aux très grandes. Une MMT possède trois axes X, Y et Z (figure 1.4) équipés de règles de mesure incrémentales de précision [6,7]. Le système électronique permet de connaître à chaque instant la position de la tête de mesure dans le repère machine, lorsque le palpeur touche la surface de pièce, la position du centre du palpeur est enregistrée par le logiciel associé. Grâce aux logiciels de traitement des données et à la grande qualité géométrique de la machine et aux technologies d'acquisition, les résultats obtenus sont de plus en plus proche des valeurs vraies. Deux technologies de mesure sont utilisées sur les MMTs, machines à mesurer à contact et sans contact.

Pour la technologie de mesure à contact, la mesure se fait par un déclenchement du palpeur au moment où celui-ci entre en contact avec la surface de la pièce. Chaque contact constitue un point de coordonnées (X, Y, Z) , alors que pour celle sans contact la mesure se fait par un envoi des rayons lumineux sur la surface de la pièce à contrôler, le retour des rayons permet de calculer les coordonnées de points qui permettent au logiciel la reconstruction de la surface scannée. Les MMTs de dernière génération combinent les deux types de mesures. Il existe plusieurs catégories de machines à mesurer tridimensionnelles, elles sont utilisées selon le besoin en taille ou en volume.

Spécificité d'une MMT

Une machine à mesurer tridimensionnelle est généralement constituée de 4 sous-ensembles

- La structure de déplacement
- Le système de palpation
- Le système électronique
- Le système informatique et boîtier de commande.

Quand on effectue des mesures sur une MMT, [8,9 ,10], à chaque fois que le palpeur entre en contact avec une surface de la pièce sa position dans le système de coordonnées de la machine est enregistrée.

La figure 1.4, montre une structure de principe d'une MMT présentant les différentes parties.

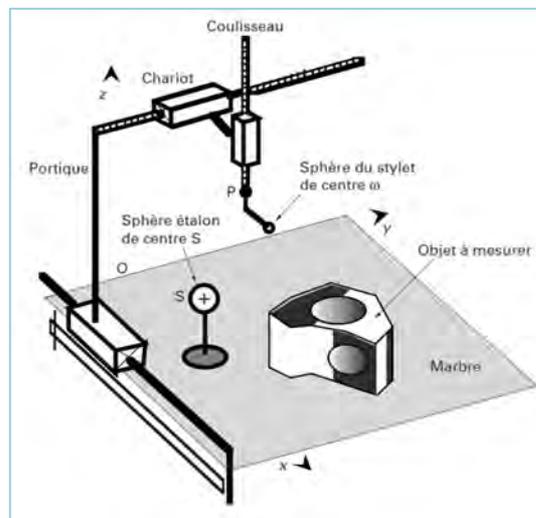


Figure 1. 4 - Structure de principe d'une MMT [9]

1.2.3 La mesure 3D

La technologie de mesure tridimensionnelle, a franchi des étapes d'évolution et d'innovation pour être à un niveau de pointe aujourd'hui. Elle n'est pas du reste dans le développement des nouvelles technologies, on peut tracer quelques évolutions et moments clés de son histoire.

La figure 1.5 trace par couleur les évolutions et moments clés de l'histoire de la mesure 3D.

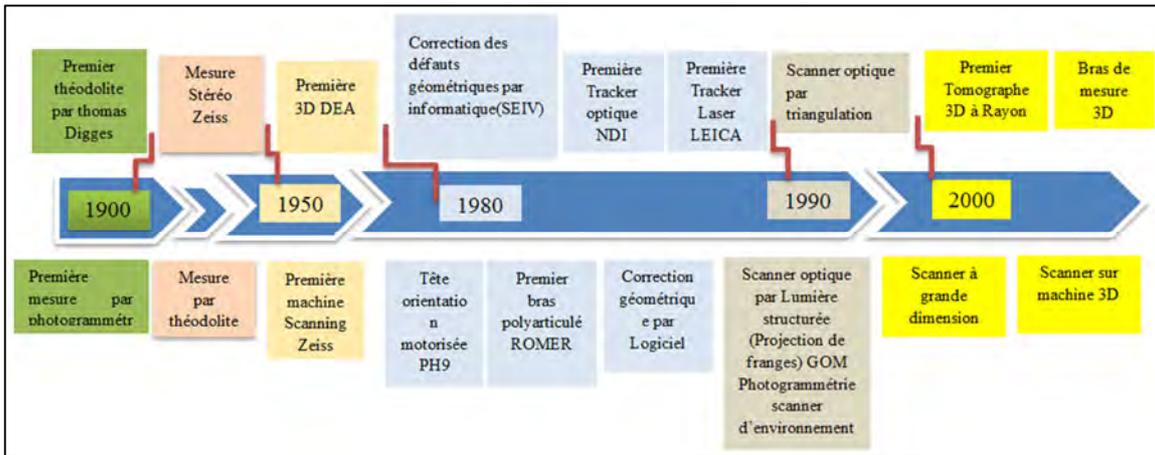


Figure 1.5 - les moments clés de l'histoire de la mesure 3D [6]

Les besoins de l'industrie ont évolué. Les mesures de pièces de grands volumes demandent plus d'exigences. C'est pour cette raison que le tracker laser (dispositif de mesure longue portée composé d'une source laser intégrée à une station permettant de mesurer les coordonnées du centre d'un réflecteur) a conquis une place importante dans l'industrie.

Au début, les mesures étaient peu ergonomiques, car il ne fallait en aucun cas interrompre la mesure (toute coupure du faisceau laser faisant perdre les références). L'utilisation de ces dispositifs n'était donc pas très conviviale mais les nouveaux trackers laser sont devenus plus portables, flexibles dans leur utilisation, leur associant d'autres dispositifs (mesures de points cachés, scans lasers, localisation automatique des réflecteurs...).

Certes les mesures par contact sont assez bien maîtrisées mais elles ne répondent pas forcément à tous les besoins. En effet, si l'on souhaite mesurer des surfaces avec un grand nombre de points et très rapidement, les dispositifs à contact sont généralement limités. Il faut donc se tourner vers de la mesure sans contact. [7]

Ce type de mesure se démocratise pour plusieurs raisons. Il est devenu possible, grâce à l'amélioration des outils de calculs, de travailler sur un grand nombre de points (plusieurs

millions) ce qui permet d'avoir une représentation complète de la pièce et une meilleure appréhension des résultats.

1.2.4 La demande de la mesure 3D

Le besoin de la mesure 3D ne cesse de s'étendre. Appuyé par la concurrence et poussé par les avancées technologiques, les outils 3D se répandent chaque jour dans les mains de nouveaux opérateurs. Mais à quels besoins répondent-ils ? Quels sont les secteurs porteurs de la mesure ? Quel est l'avenir de la mesure 3D ?

La métrologie dimensionnelle se retrouve de manière forte sur l'ensemble des secteurs de l'industrie [8] comme le transport, l'aéronautique, le BTP, l'électronique, l'énergie...

Après de nombreuses années de faibles évolutions (jusque dans les années 90), les technologies de mesure ont profité d'une forte poussée liée aux développements des systèmes informatiques et à l'arrivée de nouveaux moyens.

L'importante diminution des temps de traitement des données de mesure, a permis l'avènement en zone de production, de nombreux produits de numérisation. Cette mutation, a permis une augmentation du niveau de qualité, en fournissant un nombre important d'informations permettant non seulement un affinement des analyses, mais également un meilleur suivi des procédés.

De plus, des nouveaux produits s'appuient désormais sur des moyens tels que les robots ou les systèmes embarqués basés sur l'optique laser, lumière structurée, caméra, etc.

Cette tendance s'accélère. La demande des industriels, tous secteurs d'activités confondus, s'oriente de plus en plus vers des contrôles en ligne de fabrication. De nouveaux outils de mesure 3D se développent pour répondre à ce besoin.

Productivité et qualité, deux termes souvent vus comme antagonistes, ouvrent paradoxalement de nouvelles perspectives d'évolution au secteur de la métrologie tridimensionnelle.

Des secteurs tels que l'aéronautique, la construction navale, les ouvrages d'art, et autres producteurs d'éléments de grandes dimensions sont tous demandeurs de moyens de mesure et de numérisation adaptés aux larges volumes. En cela, certains produits ont conquis une part importante du marché pour leur capacité à mesurer des volumes importants tout en garantissant exactitude de mesure, automatisation, portabilité et fiabilité. Les figures 1.6 et 1.7 montrent la représentation d'une pièce obtenue par un palpé de points et un scanning de grande dimension.

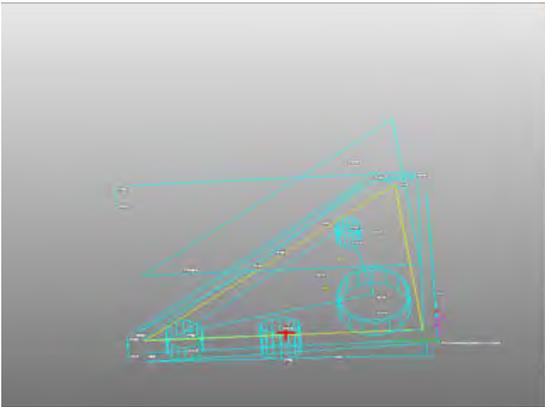


Figure 1. 6 –Image 3D obtenue par palpé de points

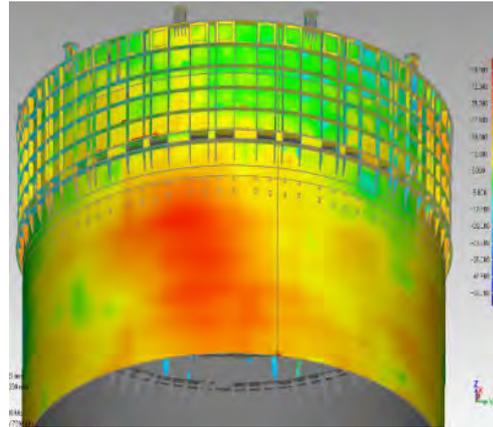


Figure 1. 7 – Image obtenue par scanning

Les machines à mesurer tridimensionnelles [10], permettent aux laboratoires de recherche – ou de prestation et aux entreprises de développer de nouvelles méthodes pour les processus de mesures et les valider, de détecter les limites de performances dans les différentes parties, et aussi de proposer des nouvelles options dans l'amélioration de la technologie.

1.2.5 Définition géométrique ISO GPS au contrôle 3D

La spécification géométrique de produits (GPS), consiste à définir, au travers d'un dessin de définition ou conception assistée par ordinateur (CAO) la géométrie, les dimensions et les caractéristiques de surface d'une pièce qui en garantissent un fonctionnement optimal, ainsi que la dispersion autour de cet optimal pour laquelle la fonction est toujours satisfaisante.

Les pièces fabriquées ont toujours des défauts géométriques, il peut y avoir des écarts par rapport au fonctionnement optimal. Le contrôle 3D permet donc de connaître les défauts afin de les comparer aux spécifications définies pour l'idéal.

Des normes ont été développées pour permettre de faire une liaison entre la pièce nominale imaginée par le concepteur, la pièce réelle fabriquée et la connaissance de la pièce obtenue par le mesurage [11].

Les normes ISO GPS, ainsi développées ont mutualisé les spécifications en un seul langage symbolique. Il doit être compris par toutes les parties concernées, les concepteurs, les fabricants et les contrôleurs. Ce langage univoque exprime des besoins fonctionnels et des vérifications à partir de spécifications renseignées sur la CAO.

1.2.6 Tolérancement géométrique (Tolérancement 3D)

Le tolérancement définit les limites de variations des écarts entre la géométrie nominale et une représentation réelle. [12, 13]

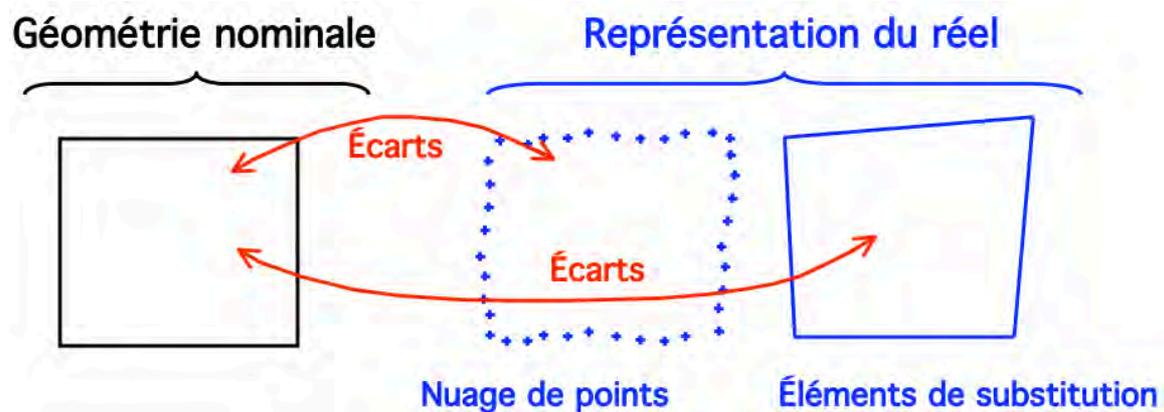


Figure 1. 8 - Modèle nominal et réel [15].

Le tolérancement géométrique, est un ensemble de quatre(4) aspects de l'élément d'une pièce qui sont les suivants :

- Tolérance de forme,
- Tolérance Orientation,
- Tolérance Position,
- Tolérance Battement.

Les tolérances dimensionnelles et géométriques [12], définissent la fonction de la pièce à contrôler, que la CAO devrait les spécifier.

A chacune de ces tolérances un certain nombre de caractéristiques sont associées, elles sont désignées par de symboles, qui peuvent être associées ou non à une référence [12], selon la spécification définie à évaluer, le tableau 1 présente un récapitulatif détaillé.

Tableau 1 - Symboles des caractéristiques géométriques, [12]

Tolérances	Caractéristiques	Symboles	Référence associée
Forme	Rectitude		non
	Planéité		non
	Circularité		non
	Cylindricité		non
	Profil d'une ligne		non
	Profil d'une surface		non
Orientation	Parallélisme		oui
	Perpendicularité		oui
	Inclinaison		oui
	Profil d'une ligne		oui
	Profil d'une surface		oui
Position	Localisation		Oui ou non
	Concentricité (pour les centres)		oui
	Coaxialité (pour des axes)		oui
	Symétrie		oui
	Profil d'une ligne		oui
	Profil d'une surface		oui
Battement	Battement circulaire		oui
	Battement total		oui

Un contrôleur de mesure 3D, doit pouvoir, analyser de façon univoque tous les symboles et les caractéristiques associées. Il est préférable d'avoir un système de référence adapté au type de spécifications indiquées sur la CAO ou le plan de la pièce à contrôler. Ce choix n'est pas toujours une chose aisée. Les contrôleurs souhaitent déclarer des pièces conformes ou non conformes avec une bonne définition du référentiel sur le plan à matérialiser à l'identique sur l'objet réel.

1.2.7 Le système de référence spécifié [14],

Un système de références spécifiées est composé de plusieurs références spécifiées, simples ou commune (élément du type théorique point, droite ou plan). Elles permettent de contraindre les zones de tolérances en position, en orientation, le système de références spécifiées ou références spécifiées, sont considérées comme les moyens de bloquer les degrés de liberté, le nombre des degrés de liberté est fonction de la forme nominale des éléments ayant servi pour l'établissement de la référence spécifiée, primaire, secondaire, ou tertiaire, et de la caractéristique tolérance indiquée dans le cadre de tolérance géométrique.

1.2.7.1 Élément de situation

Point, droite, plan ou hélice à partir duquel la position et/ou l'orientation d'un élément géométrique peut être défini.

1.2.7.2 Référence spécifiée réelle

Élément intégral réel (non idéal) utilisé pour établir une référence spécifiée unique.

1.2.7.3 Référence spécifiée

Un ou plusieurs éléments de situation (point, droite, plan ou hélice) issus d'un ou plusieurs éléments intégraux associés.

1.2.7.4 Référence spécifiée unique

Référence spécifiée établie à partir d'une référence spécifiée réelle d'une surface unique ou d'une entité dimensionnelle unique [14].

1.2.7.5 Référence spécifiée commune

Référence spécifiée établie simultanément, sans ordre spécifique, à partir d'au moins deux références spécifiées réelles, [14].

1.2.7.6 Section de référence spécifiée

Élément de spécification contenant un, deux ou trois indicateurs de référence spécifiée.

1.2.7.7 Indicateur de référence spécifiée

Élément de spécification ne contenant qu'une référence spécifiée unique ou commune

1.2.7.8 Référence spécifiée primaire

Référence spécifiée unique ou commune, qui est indiquée dans le premier indicateur de référence spécifiée de la section de référence spécifiée et qui n'est pas influencée par les contraintes des autres références spécifiées.

1.2.7.9 Référence spécifiée secondaire

Référence spécifiée unique ou commune, qui est indiquée dans le deuxième indicateur de référence spécifiée de la section de référence spécifiée et qui est contrainte au moins en orientation par rapport à la référence spécifiée primaire.

1.2.7.10 Référence spécifiée tertiaire

Référence spécifiée unique ou commune, qui est indiquée dans le troisième indicateur de référence spécifiée de la section de référence spécifiée et qui est contrainte au moins en orientation par rapport aux références spécifiées primaire et secondaire.

Les références spécifiées ainsi définies, sont considérées dans un ordre particulier, du fait que la référence spécifiée primaire impose des contraintes d'orientation sur les deux autres références ; et la référence spécifiée secondaire impose des contraintes d'orientation à la référence tertiaire.

Les figures ci-dessous montrent la représentation système des références spécifiées dans l'ordre.



Figure 1. 10 - Référence spécifiée simple.

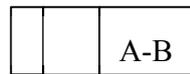


Figure 1. 9 - Référence spécifiée commune.

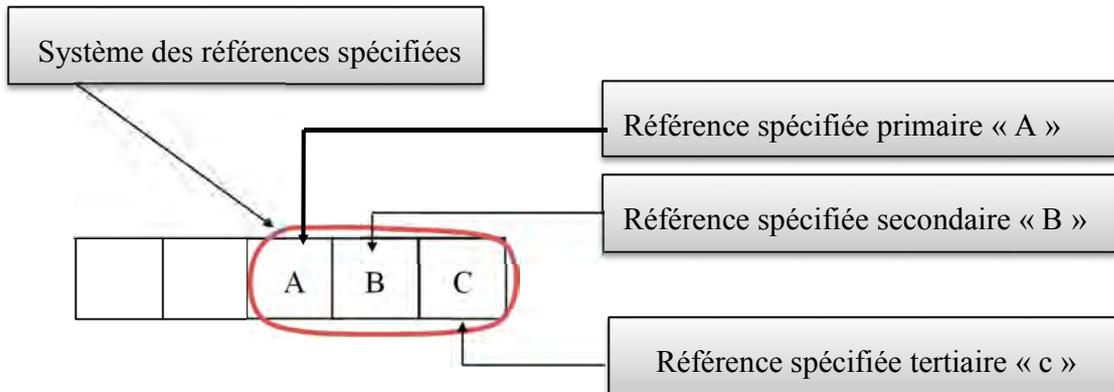


Figure 1. 11 - Références spécifiées

Les références spécifiées simples et communes peuvent être utilisées dans un système, le cadre de tolérance comportera quatre(4) cases.

Dans les figures 1.12, nous présentons les nouvelles représentations d'une section de référence spécifiée de la dernière version de la norme ISO 5459 [14], où a représenté la section de référence spécifiée.

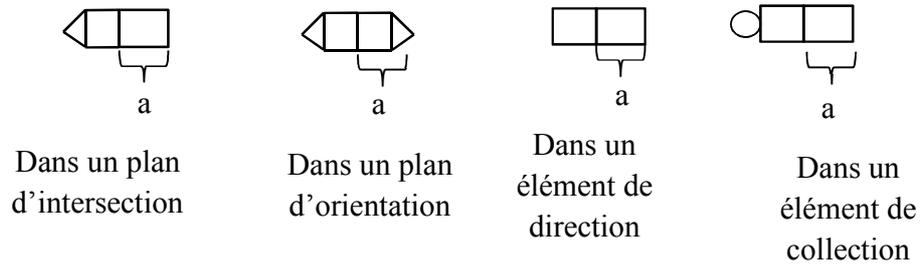


Figure 1.12 - Position de la section de référence spécifiée dans un élément de spécification [13]

La figure 1.13, illustre un exemple de la section de référence spécifiée.

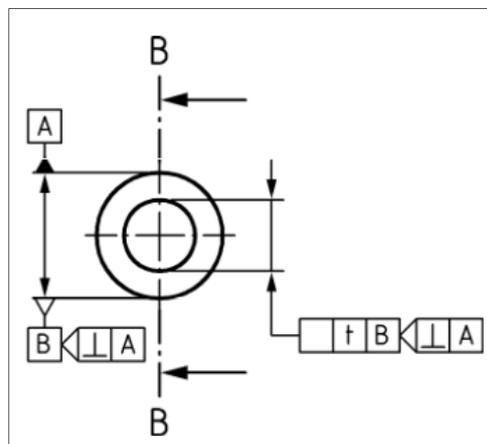


Figure 1.13 - exemple position de la section de référence spécifiée

1.2.8 La zone de tolérance

Elle est définie par la norme ISO [12], un espace limité par une ou plusieurs lignes ou surfaces géométriquement parfaites, et caractérisée par une dimension linéaire.

La zone de tolérance est un espace qui peut être soit :

- entre deux surfaces équidistantes ou deux plans parallèles ;
- à l'intérieur d'un cylindre ;
- à l'intérieur d'un cercle ;
- à l'intérieur d'une sphère ;
- entre deux cylindres coaxiaux ;
- entre deux cercles concentriques ;
- entre deux lignes équidistantes ou deux droites parallèles.

La zone de tolérance est définie par la valeur de la tolérance, indiquée dans le cadre de tolérance. La figure 1.14 illustre une représentation de la zone de tolérance, de l'élément tolérancé qui est le plan « A », et la caractéristique spécifiée, est une localisation.

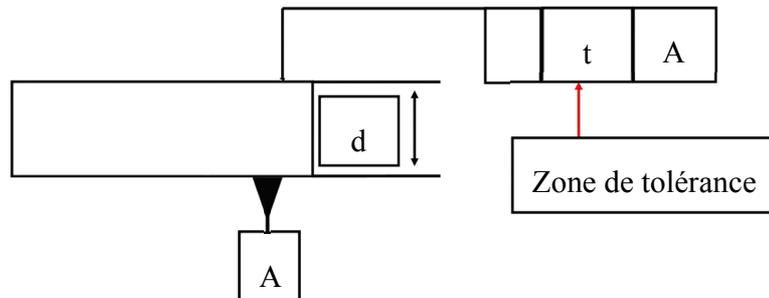


Figure 1.14 - Zone de tolérance

1.2.9 Eléments tolérancés

Les éléments tolérancés sont des éléments réels, ponctuels, linéiques, et surfaciques à l'exception de l'application « tolérance projetée », [NF E04-558] [16], [17].

Les éléments tolérancés sont désignés par la flèche qui lie le cadre de tolérance à l'élément. La zone de tolérance projetée est identifiée par le modificateur de spécification symbolisé par **(P)**.

1.2.9.1 Exigence d'enveloppe

L'exigence d'enveloppe est utilisée pour limiter les défauts de forme, elle est représentée par le symbole **(E)** et placée à droite de la valeur de tolérance dans le cadre de tolérance.

Une spécification qui correspond à une fonction de montage, qui peut être utilisée pour les cylindres et les prismes, Chaque dimension doit respecter l'intervalle de tolérance.

1.2.9.2 Maximum matière

Est un modificateur utilisé pour augmenter la tolérance géométrique, pour le montage des pièces, lorsqu'une dimension n'est pas au maximum de matière.

L'exigence du maximum de matière doit être indiquée par le symbole du modificateur de spécification **(M)** est placé à la suite de la valeur de tolérance spécifiée, de la lettre de référence ou des deux. Selon la norme [12].

1.2.9.3 Minimum matière

L'exigence du maximum de matière doit être indiquée par le symbole du modificateur de spécification L entouré, est placé à la suite de la valeur de tolérance spécifiée, de la lettre de référence ou des deux. Selon la norme [12],

L'exigence du minimum de matière est définie dans la même logique du maximum de matière, mais son utilisation est différente et opposée, le cas plus défavorable envisagé correspond au minimum de matière. L'utilisation est réservée pour exprimer un besoin fonctionnel telle que la conservation du minimum de matière.

La figure 1.15 illustre du maximum de matière dans le cadre de tolérance.



Figure 1. 15 - Illustration du maximum de matière [15]

1.2.10 Principe d'indépendance

Le principe d'indépendance est l'une des principes tolérancement, la norme [12], le définit de la manière suivante :

Par défaut, chaque spécification GPS pour un élément ou une relation entre des éléments doit être satisfaite de manière indépendante des autres spécifications. Sauf lorsqu'une forme ou une indication particulière définissent un lien entre les exigences dans le cadre de la spécification considérée.

Cela signifie, que pour un élément ou un ensemble d'éléments d'une pièce, les spécifications de dimension, d'orientation et position, qui les portent sont toutes indépendantes.

1.2.11 Concept de spécification géométrique des produits(GPS)

L'organisation internationale de normalisation ISO, définit une norme comme un document qui définit, des exigences , des spécifications, des lignes directrices, ou des caractéristiques

à utiliser systématiquement pour assurer à l'emploi des matériaux, produits, processus et services.

1.2.11.1 Objectifs

Avec l'évolution technologique et technique, par une demande croissante d'amélioration de qualité de produits et services, les normes GPS ont été développées et n'ont cessé d'évoluer, et proposer un langage de spécifications de produits pour :

- l'expression sans ambiguïté des exigences fonctionnelles des mécanismes,
- une base théorique robuste, permettant la caractérisation précise des conditions

fonctionnelles, de leur contrôle ainsi que la prise en compte des évolutions futures, technologiques et des systèmes informatiques,

- un code univoque et international,
- une cohérence globale de l'ensemble des normes, évitant les oublis et les redondances ou les interprétations multiples.

1.2.12 Normes ISO de Spécification Géométrique de Produits(GPS)

Dans les différentes étapes du cycle de vie des pièces, le système ISO GPS est utilisé pour la description des caractéristiques, de la conception au contrôle. Elles sont classées par type pour les différentes catégories de propriétés géométriques de pièces, suivantes identifiées actuellement, mais la liste n'est pas exhaustive, elle peut être longue avec l'évolution des normes ISO GPS.

Propriétés géométriques identifiées dans le système ISO GPS actuel NF EN ISO 14638 [18].

Taille, distance, forme, orientation, position, battement, état de surface du profil, état de surface surfacique, défauts de surface.

Chacune de ces propriétés géométriques peut être subdivisée en des types de normes ISO GPS.

Les normes ISO GPS fondamentales, elles définissent les règles et les principes qui s'appliquent à toutes les catégories de propriété géométrique et à tous les maillons dans la matrice ISO GPS.

Les normes ISO GPS générales, ce sont des normes s'appliquant à au moins une catégorie de propriété géométrique, et à au moins un maillon mais elles ne sont pas des normes fondamentales.

Les normes ISO GPS complémentaires, ce sont des normes s'appliquant à des procédés de fabrication spécifiques ou à des éléments de machine spécifiques.

Des améliorations et suppressions sont toujours apportées, dans le développement des normes, dans la version récente de la norme [18], les normes sont classées suivant une logique, permettant de les regrouper dans une matrice de sept (7) maillons repérés par de lettres de A à G, qui sont représentées par colonne chacune, chaque colonne représente une fonction du cycle de la vie d'un produit (pièce), et les lignes sont représentées par les neuf (9) propriétés géométriques citées précédemment.

Le tableau 2, illustre représentation de la matrice des normes ISO GPS, qui donne une vue générale des normes ISO du système de Spécification géométrique de produits.

Tableau 2 : Modèle matrice des normes ISO GPS, [18]

Caractéristiques géométriques	Maillons						
	A	B	C	D	E	F	G
	Symboles et indication	Exigences de l'élément	Propriétés de l'élément	Conformité et non-conformité	mesurage	Equipement de mesure	Etalonnage
Taille							
Distance							
Forme							
Orientation							
position							
Battement							
Etat de surface du profil							
Etat de surface surfacique							
Défauts de surface							

La matrice de normes ISO, est outil très pratique, qui permet de retrouver facilement la correspondance des normes dans les maillons et vérifier quelles sont les normes dans chaque maillon traitant une caractéristique géométrique.

1.2.13 Les maillons

Un ensemble de sept(7) maillons, conformément au tableau 2, tout maillon comprend un certain de nombre de normes selon les caractéristiques géométriques [18].

Maillon A

Les symboles et indications sont concernés par ce maillon, les normes ISO GPS définissant la forme, et les proportions des symboles, indications et modificateurs ainsi que les règles régissant leur utilisation, ces normes sont comprises dans ce maillon.

Maillon B

Des normes de plusieurs caractéristiques géométriques, sont comprises par ce maillon, celles définissant des caractéristiques, des zones de tolérance, des contraintes et paramètres. Cela y compris les normes qui définissent des caractéristiques géométriques, des propriétés de taille, des paramètres d'état de surface, la forme, la taille, l'orientation et la position des zones tolérance, et les définitions des paramètres.

Maillon C

Les normes qui définissent les propriétés des éléments suivantes sont dans ce maillon :

Des caractéristiques et des conditions des éléments sur une pièce. Inclues aussi celles définissant les opérations de partition, d'extraction, de filtrage, d'association, de collection et de construction.

Maillon D

Un maillon essentiel pour l'amélioration de la qualité des produits, regroupe les normes définissant les exigences pour la comparaison entre les exigences de spécification et les résultats de vérification. Et aussi celles traitant de l'incertitude, un des aspects qui sera développé aussi dans ce travail.

Maillon E

On retrouve dans le maillon E, les normes ISO GPS définissant les exigences pour mesurer les caractéristiques et les conditions des éléments.

Maillon F

Les normes concernées par les exigences relatives à l'équipement pour le mesurage, se trouvent dans ce maillon.

Maillon G

Ce maillon qui vient en dernière position de la matrice, comprend les normes fixant les exigences relatives à l'étalonnage et aux modes opératoires d'étalonnage de l'équipement de mesure.

Ces maillons permettent, à tous les acteurs qui interviennent dans le cycle de la vie de produits de bien se repérer, et utiliser les bons outils nécessaires selon les exigences du niveau de la matrice.

Le tableau 3 montre l'exemple de l'utilisation de matrice de normes ISO GPS, ici nous prenons quelques-unes des normes comprises dans les maillons avec les correspondances de caractéristiques géométriques.

Tableau 3 : Identification de quelques normes se reportant aux maillons, [ISO NF EN 14638].

Caractéristiques géométriques	Maillons						
	A	B	C	D	E	F	G
	Symboles et indication	Exigences de l'élément	Propriétés de l'élément	Conformité et non-conformité	mesurage	Equipement de mesure	Etalonnage
Taille	ISO 14405-1 [16]	ISO 14405-1 [16]	ISO 286-1[19]	ISO/TR 16015[]	ISO 1938-1 [24]	ISO 463 [25]	ISO/TS 15530-3[4]
Distance			ISO 14405-1 [16]				
Forme			ISO 1101 [12] ISO 12181-1[20]				
Orientation			ISO 1101[12] ISO 5458[21]				
position			ISO 1101[12] ISO 5458[21]				
Battement			ISO 1101 [12]				
Etat de surface du profil			ISO 4288[22]				
Etat de surface surfacique			ISO 25178-601 [23]				
Défauts de surface						ISO 32274 [26]	

Les normes ISO de spécification géométrique de produits, se sont développées aussi, pour la partie concernée, par les machines à mesurer tridimensionnelle avec leur évolution technologique rapide d'une part, et pour les outils qui sont associés à ces machines d'autre part. Ces logiciels de machines à mesurer tridimensionnelle se sont multipliés sans un étalon à approprié, pour la garantie de la qualité de résultats de mesures 3D.

Ces normes, dans leur série relative aux machines à mesurer tridimensionnelles, fixent des exigences et des conditions, sur les essais de réception et de vérifications, aussi les caractéristiques métrologiques, et les techniques de détermination des incertitudes. Pour la mise en service de la machine, et durant la période de fonctionnement. Et aussi des exigences aux logiciels associés aux MMTs, permettant le traitement des résultats de mesures.

Pour les exigences et conditions des essais de réception et de vérification périodique, sont décrites dans les normes ISO [27, 28].

La mesure 3D, est devenue très essentielle pour les industries, elle est demandée presque dans tous les secteurs. La qualité de résultats est une exigence première. Pour maîtriser cette qualité, les utilisateurs de machines à mesurer tridimensionnelles doivent traiter les résultats de leurs mesures et déterminer les incertitudes.

Les techniques de détermination des incertitudes de machines à mesurer tridimensionnelles et les exigences relatives aux logiciels d'évaluations des incertitudes de mesure de machines à mesurer tridimensionnelles, sont définies par la norme [4].

L'application ces exigences et techniques, ne sont pas respectées, surtout les techniques de détermination des incertitudes destinées aux contrôleurs de mesures 3D, ces techniques décrites dans les normes, elles ne sont pas applicables à un certain niveau de la pratique.

1.3 Etat de l'art

1.3.1 Travaux déjà effectués

Plusieurs travaux de recherches ont été effectués, sur l'estimation des incertitudes associées aux résultats de mesures, de machines à mesurer tridimensionnelles, sous différents angles, certains sur les machines, d'autres sur les méthodes d'évaluation des incertitudes de mesure.

Vu la complexité de la détermination de l'incertitude de mesure sur une MMT, cette tâche est rendue difficile par le nombre de facteurs influents non maîtrisés dans les résultats de mesure. Des nombreux travaux réalisés, proposent des approches et méthodes d'estimation des incertitudes associées aux résultats de processus de mesure sur MMT.

C.wadel [29], propose un guide synthétisant l'approche de calcul des incertitudes, pouvant servir la base de calcul des incertitudes de mesures sur machine à mesurer tridimensionnelle. Il répartit les causes des incertitudes mesures 3D en deux groupes : les causes des incertitudes de mesures 3D, quantifiables et non quantifiables. Il utilise la méthode GUM pour estimer des incertitudes de mesures, et suppose que cette méthode est applicable à tout type de MMT. Mais nous avons trouvé que cette méthode n'est pas applicable en pratique, avec les logiciels de mesure 3D actuels.

A.jalid, S.Hariri, J.P.Senelaer, et A.El Gharad, [30] dans leurs travaux, ont fait une étude comparative entre deux méthodes d'estimation des incertitudes des résultats de mesure sur MMT, la méthode de GUM et la Méthode de Monte Carlo, en appliquant sur la planéité[31-32] d'une pièce étalon. Ils constatent que, après le traitement des résultats comparatifs, par les deux méthodes, les défauts de forme trouvés sont presque identiques ; en conclusion ils valident les deux méthodes pour l'évaluation des incertitudes associées aux résultats de mesure d'une MMT, pour la planéité de la pièce. Mais ils ne font pas des détails sur les différences fondamentales qui existent entre les deux méthodes.

Fékria Romdhani, [33], dans ses travaux, pour la détermination des incertitudes de mesures de bras polyarticulés, a fait une étude plus détaillée sur les deux méthodes afin de choisir l'une pour l'appliquer au processus de mesure de MMT bras polyarticulé. L'objectif est de déterminer un modèle permettant d'estimer des incertitudes d'un processus de mesure.

Elle trouve qu'en utilisant la méthode de Monte Carlo, on peut optimiser le processus de mesure par l'étude des pondérations des différents paramètres d'influence.

La méthode de Monte Carlo ne nécessite pas une dérivation pour propager les distributions, ce qui n'est pas le cas dans la méthode du GUM, pour rester dans le domaine linéaire, il faut dériver le modèle mathématique au premier ordre.

Elle présente dans un tableau comparatif des étapes de processus de mesure les deux méthodes.

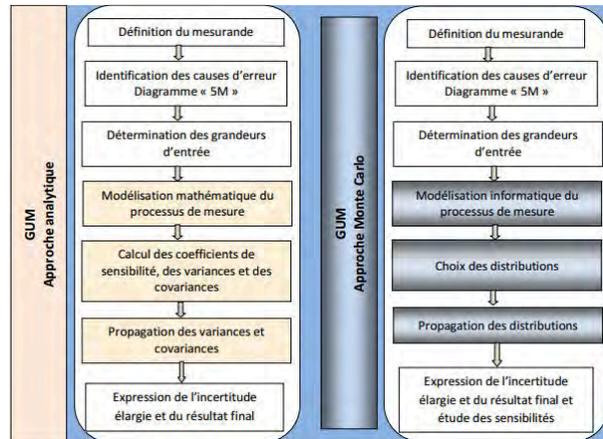


Figure 1. 16 - Schéma comparatif des deux méthodes pour l'estimation des incertitudes de mesure, le GUM et son Supplément 1 sur la méthode de Monte Carlo. [33]

La figure 1.16, a permis de comparer les deux méthodes, et le choix porté sur la méthode de Monte Carlo.

Fékria décompose la méthode de Monte Carlo en deux niveaux, 1 et 2, pour appliquer dans les expérimentations, le niveau 1 pour la détermination des incertitudes de mesures liées au bras de mesure MMT, et le niveau 2 permettant de déterminer les incertitudes de mesures liées à la pièce contrôlée. Elle applique sur une pièce réelle, une bague.

Par contre la méthode développée n'est peut être applicable que, si le modèle est testé par d'autres études sur des différents mesurandes, de diverses pièces mécaniques.

H. Gheribi, S. Boukebbab, I. Amara, J.M. Linares, [34], entreprennent une démarche de formulation matricielle, pour proposer un guide présentant l'approche pour l'estimation des incertitudes de mesures. Pour la mise en évidence des incertitudes de mesure dans la vérification des tolérances géométriques, ils expérimentent ce guide sur une machine à mesurer tridimensionnelle, à une pièce en appliquant à la perpendicularité de l'axe du cylindre par rapport à un plan, (figure 1.17)

Pour eux la connaissance des paramètres des éléments géométriques est nécessaire, pour l'image de l'élément mesuré, ils passent par trois modélisations du réel, par un nombre infini des points (le Skin modèle), par un nombre fini des points définis dans un repère, et des paquets des points représentant le modèle théorique exacte. Ensuite ils trouvent que, la représentation de l'élément d'une pièce, peut être différente selon les moyens matériels et les protocoles utilisés pendant le contrôle 3D, l'image de l'élément ainsi obtenue est proche de l'image réelle, mais pas exactement la même, (figure 1.17).

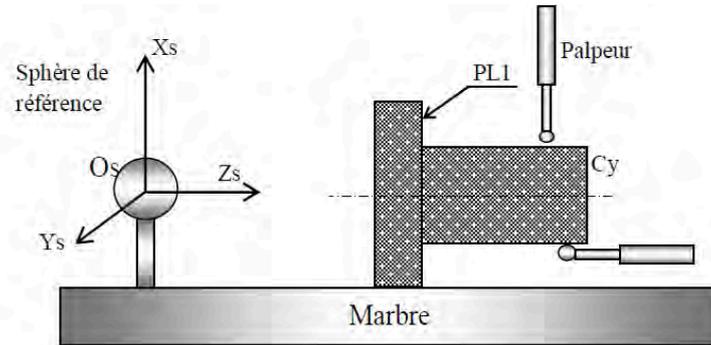


Figure 1.17 – Gamme de mesure [34]

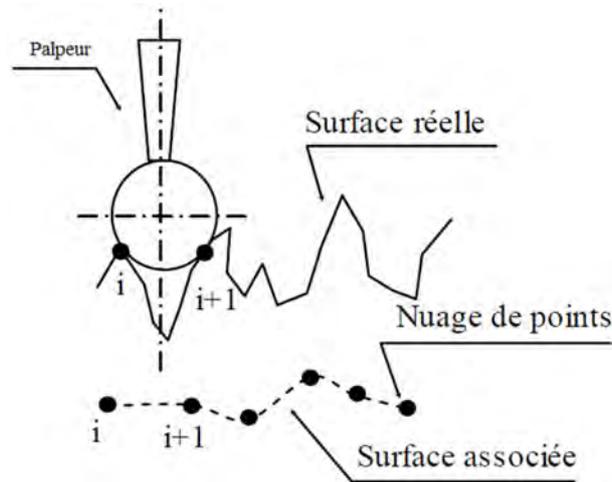


Figure 1.18 - Surface réelle et associée [34]

Ils estiment les incertitudes suivant les vecteurs des axes, X, Y en utilisant les moindres carrés, en conclusion, ils affirment que l'outil ainsi développé, permet de déterminer l'ensemble des paramètres qui caractérisent les surfaces d'une pièce à mesurer, et calculer les incertitudes. Mais la mise en évidence des facteurs plus influents, et la détermination des gammes de mesures, ne sont pas encore appropriés.

V. Wolff et T. Tran Dinh, [35] ont fait une étude de comparaison de deux types de machines (à contact et sans contact) afin d'optimiser le processus de mesure, mais ils ont réalisé l'expérience sur une seule spécification, la circularité, [36,37] de la pièce.

A. jalid, S. Hariri, J.P. Senelaer, et A. El Gharad, [38], ont développé une méthode d'estimation des paramètres des surfaces et les incertitudes associées. Pour ce faire ils modélisent la problématique d'association des surfaces aux nuages de points, en utilisant la méthode des moindres carrés, pour implanter l'algorithme (figure 1.19), dans un programme informatique, et la valider, ils effectuent une comparaison avec le modèle de démarche de

validation préconisé par la norme ISO 10360-6 [28], (figure 1.20). Pour la mise en expérimentation sur une machine à mesurer tridimensionnelle, trois types de pièces, une cale étalon, une bague, la sphère d'étalonnage, et une pièce industrielle, ont fait l'objet l'expérimentation. Les résultats obtenus par leur application sont comparés avec ceux obtenus par le logiciel Metrolog associé à la MMT, et aux valeurs des certificats d'étalonnage. Ils jugent les écarts des résultats non significatifs. La démarche l'estimation des paramètres de l'élément géométrique tient compte de l'incertitude associée sur les coordonnées des points palpés et peut se faire dans tout repère.

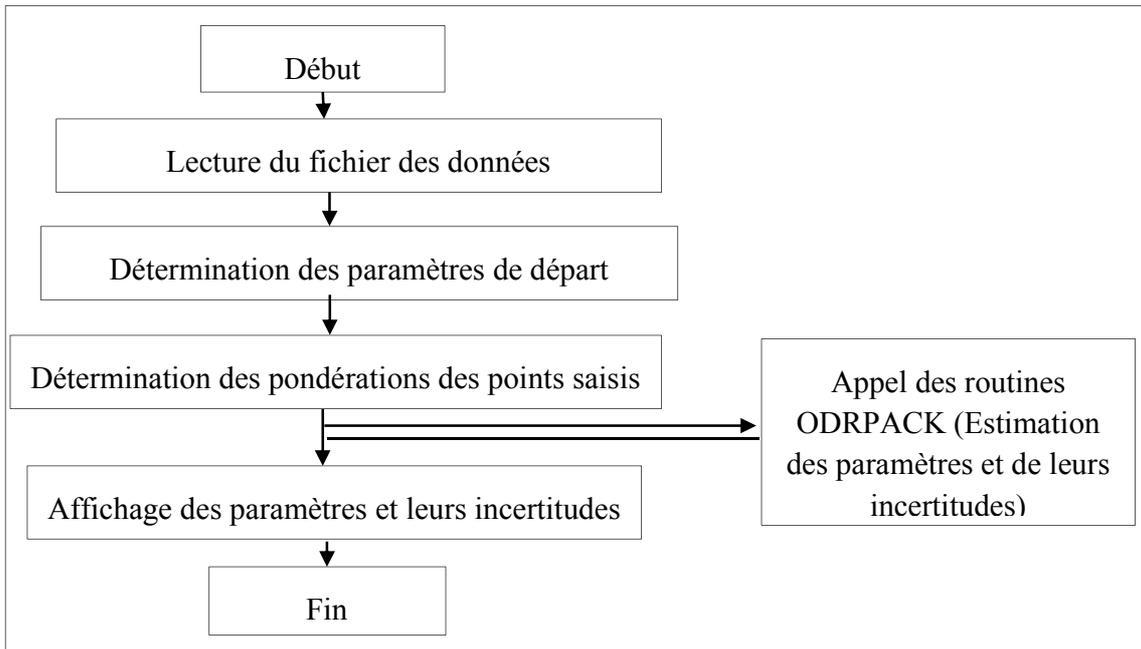


Figure 1. 19 - Algorithme proposé [38]

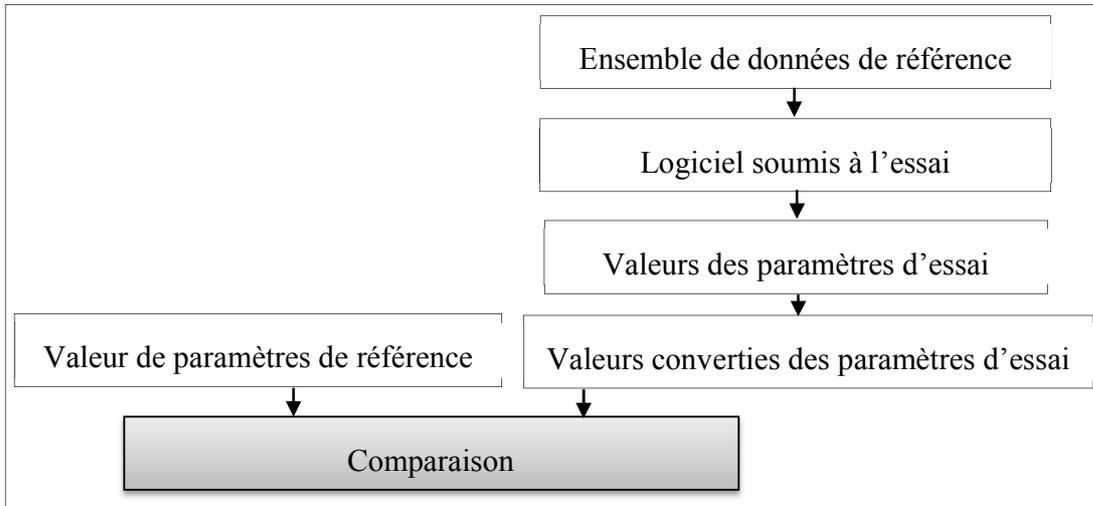


Figure 1. 20 - Démarche de validation [28]

Manlay Jean-François, [39], développe une approche pratique, pour les calculs des incertitudes de mesure 3D. Pour entreprendre cette approche, il répartit l'incertitude en trois parties distinctes, une liée à la machine, une liée à la pièce à mesurer, et une liée à la méthode de contrôle. Son approche est simple, à chaque configuration ou changement du ou des palpeur(s), des calculs d'incertitudes de type A et type B, sur le palpeur et la machine, sont effectués, la maîtrise des résultats de mesures passe par la connaissance parfaite des moyens de mesure. Après la mesure de la pièce est calculée l'incertitude liée à chacune des spécifications de la pièce contrôlée. Il propose un modèle, et le met en application sur une distance entre un point et un plan en tenant compte de la planéité du plan de la pièce.

Le modèle proposé, peut aider à prendre certaines décisions de conformité ou non de quelques spécifications de pièces mesurées, mais demande plus de temps pour mettre en application pour la gamme de mesure, et n'est pas encore vérifié sur bon nombre des grandeurs.

P. Swornowski et M. Rucki [40], ont fait des recherches pour déterminer les caractéristiques des erreurs dans le logiciel de MMT en comparant les méthodes (Gauss, Tschebyscheff), par des mesures physiques sur des diamètres de cercles et ils ont utilisé un seul logiciel, dans leurs résultats ils trouvent des écarts par rapport aux valeurs nominales avec toutes les méthodes. Ils soulignent l'inexactitude des méthodes dans les résultats de mesure et l'importance du point de vue métrologique de connaître les erreurs que produisent les logiciels.

M. Trenk, M. Franke, Dr. H. Schwenke, [41], ont fait une étude sur un outil logiciel d'évaluation d'incertitude développé par le PTB, destiné aux laboratoires d'étalonnage.

Dans cette étude ils ont présenté le concept de la machine à mesurer tridimensionnelle virtuelle (figure 1.21). Ils montrent l'importance de la métrologie 3D et de la traçabilité de mesures.

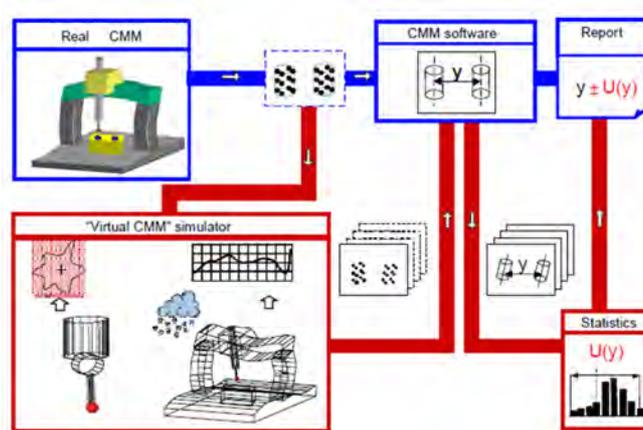


Figure 1. 21 - Flux de données du calibre virtuel MMT [41]

Jean Marc Linares, Jérôme Bachmann, Jean Michel Sprauel, [42] ont déterminé l'incertitude de résultats de mesures effectuées sur une machine à mesurer tridimensionnelle de la surface associée. et ont montré que les logiciels de métrologie en grande partie ne peuvent déterminer que les valeurs des moyennes des paramètres de la surface associée. Ils concluent que L'automatisation du calcul des incertitudes permet d'envisager l'utilisation de la méthodologie de la recherche expérimentale afin de mettre en évidence les facteurs influents. Pour l'instant ces logiciels sont limités à la détermination de moments d'ordre 1.

Eric Pairel, [43], a développé un outil permettant d'effectuer un contrôle virtuel des tolérances, de nuages des points obtenus par un système de palpation d'une MMT. Il peut construire des éléments géométriques de la pièce par ajustement et vérifier les spécifications à contrôler de la pièce, en respectant les descriptions des normes de spécifications géométriques de produits(GPS). Mais cet outil présente plusieurs obstacles ne permettant pas d'être accessible et utilisable par une majorité des utilisateurs de MMTs. D'abord il est compatible qu'avec la version XP de Windows, et on peut ouvrir que les fichiers ASCII, alors que les logiciels de mesure 3D ont largement évolué ce dernier temps.

1.4 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons effectué une étude sur les généralités de la métrologie tridimensionnelle et défini la technologie de MMT. Nous avons présenté aussi les normes ISO GPS concernées par ce domaine et quelques travaux réalisés dans l'optique de notre recherche.

Beaucoup de travaux de recherche ont été effectués dans le domaine de la métrologie dimensionnelle, en particulier sur les machines à mesurer tridimensionnelles. Dans cette partie de thèse nous avons présenté quelques travaux déjà réalisés sur la même thématique. Certains ont fait de recherches sur la détermination de l'incertitude de mesure de la MMT, et d'autres sur les facteurs d'influences des incertitudes dans les résultats de mesure. Mais une partie qui a été toujours ignorée par les uns et des autres dans le bilan des facteurs d'influence de l'incertitude de mesure ou comme source d'incertitude. C'est la partie logicielle. Lors d'un contrôle d'une pièce sur MMT de combien contribue le logiciel dans les résultats de mesure, et d'un logiciel à un autre ?

Chapitre 2

Etude expérimentale de mesures 3D

Sommaire

2.1	Introduction.....	34
2.2	Choix de moyens de mesures.....	34
2.3	Etude préliminaire.....	35
2.3.1	Qualification du palpeur.....	35
2.3.2	Mesures tests sur une bague étalon	37
2.4	Réalisation de Mesures sur une pièce test.....	38
2.4.1	Gamme de mesure	38
2.4.2	Résultats de l'Etude préliminaire	41
2.5	Conclusion.....	41
2.6	Etude expérimentale de mesures physiques d'une pièce test (étalon).....	41
2.6.1	Introduction	41
2.6.2	Méthodologie : mise en place de la gamme de contrôle	42
2.6.2.1	Procédure de mesures.....	42
2.6.2.2	Gamme de mesurage	42
2.6.2.3	Evaluation des spécifications géométriques.....	44
2.6.2.4	Répétabilité et reproductibilité de mesures	45
2.6.3	Résultats de mesures	45
2.6.3.1	Identification des principales sources d'incertitudes.....	46
2.6.3.2	Différence entre erreur de mesure et incertitudes sur la mesure	48
2.6.3.3	Résultats expérimentaux.....	49
2.6.3.4	Inter comparaison des résultats de mesures	51
2.7	Conclusion.....	54

2.1 Introduction

Ce chapitre fait l'objet de la première étude expérimentale de mesures 3D. Il comprend entre autre le choix de moyens de mesure, de la pièce expérimentale, et de la méthodologie ou gamme de contrôle.

2.2 Choix de moyens de mesures

Pour effectuer des contrôles de pièces mécaniques sur une machine à mesurer tridimensionnelle, après la prise de connaissance sur les spécifications à vérifier de la pièce, il faut calibrer le palpeur avant toute chose.

Pour mener à bien une étude il faut connaître ses moyens de mesure. Pour ce faire, nous déterminons les caractéristiques métrologiques des machines. Ceci permet de faire un choix de moyens de mesure. Pour les études expérimentales de mesures 3D, nous avons porté notre choix sur quatre machines à mesurer tridimensionnelles :

- LK Nikon CN,
- Tri-mesure manuelle,
- Mahr K-Mess manuelle,
- et Zeiss CN.

Nous avons utilisé aussi quatre logiciels de mesure 3D associés à ces machines. Ceci constitue une partie expérimentale des travaux de la thèse. Les moyens de mesures utilisés sont présentés en détail dans le tableau 2.1 suivant.

Tableau 2.1 - Moyens de mesures

machines	Logiciels & version
Tri-mesure Manuelle	Metrolog XG 6 (06/2006)
ZEISS CN	Metrolog XG 13 (10 /2010)
Mahr K-Mes Manuelle	Cosmos 2.4 (2006)
LK Nikon CN	CMM Manager 3.4 (04/2014)

Les machines sont installées dans des salles où la température est réglée à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, en plus un thermomètre de vérification des variations de la température est placé sur le marbre de la machine figure 2.1.



Figure 2. 1 -Thermomètre de vérification des variations de la température

2.3 Etude préliminaire

2.3.1 Qualification du palpeur

Le calibrage du palpeur est une étape primordiale dans la maîtrise des résultats de mesure. L'objectif est de définir un repère de mesure de la machine permettant d'exprimer les coordonnées de tous points mesurés dans le repère, dans toutes les configurations des palpeurs. Il consiste à mesurer un nombre des points définis sur une sphère étalon ou scanner selon les fonctions de la machine. Parmi les machines que nous avons choisies pour ces expériences, une seule dispose les deux fonctions. Nous avons fait des tests des moyens 3D sur la vitesse de scan et la déflexion, appliquées aux angles (figure 2.4) sur la sphère étalon puis sur une bague étalon (figure 2.5) de diamètre 40 millimètre.

Nous avons calibré les palpeurs, par la procédure suivante :

- Placer la sphère au centre du marbre,
- Palper sur cinq points la sphère avec une répartition, un point sur les quatre côtés, et un point au sommet de la sphère (figure 2.2, figure 2.3), pour le scan, toute la sphère qui est scannée selon un pas et une vitesse de scan.

Le calibrage du palpeur SM25-3, en scan à la vitesse maximale. À une déflexion minimale de 0.100 à 0.180, et une déflexion maximale de 0.470 à 0.500, avec l'angle de scan 0° , dans ces configurations le palpeur reste bloqué à la sphère, le logiciel n'arrive pas à faire la

reconnaissance des coordonnées de points, donc la déflexion est un paramètre important que le contrôleur doit prendre en compte dans le calibrage des palpeurs, surtout si le scan intervient dans le contrôle.



Figure 2.3 - Mesure de points à côté de la sphère étalon



Figure 2.3 - Mesure d'un point au sommet de la sphère étalon

La figure 2.4, montre le calibrage du palpeur aux différents angles. Avec certaines MMTs on peut calibrer le même palpeur à différentes positions selon la complexité de la pièce à contrôler.

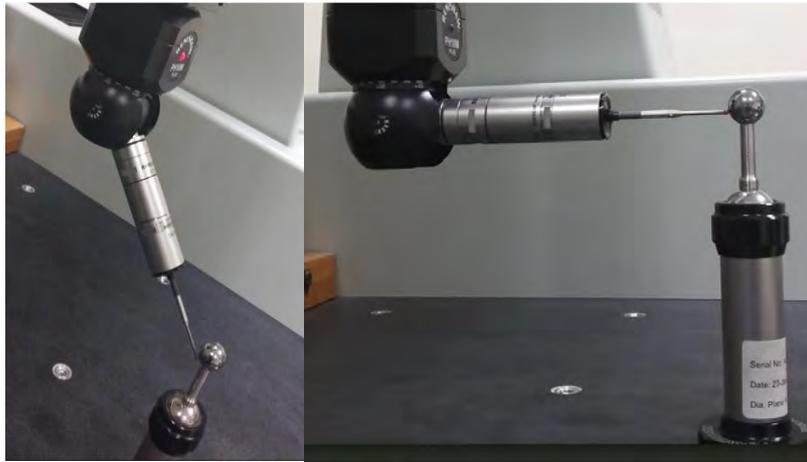


Figure 2. 4 - Calibrage du palpeur à 45° et 90°.

Pour cette partie de notre étude, nous commençons par une étude préliminaire des pièces sur une machine à mesurer tridimensionnelle.

2.3.2 Mesures tests sur une bague étalon

Les mesures sur la bague sont divisées en cercles et cylindres, aux configurations précédentes on a ajouté les configurations suivantes :

Pas d'acquisition 0.1

Distance d'approche du palpeur 0.50

Déflexion min : de 0.100 à 0.250

De 8 à 250 points, pour les cercles et d'hélices : de 4 à 30 tours, pour les cylindres.

Contrairement au calibrage du palpeur, pour ces configurations le programme s'exécute normalement en prise des points et en scan. On constate que les types des pièces ont un effet dans les configurations.

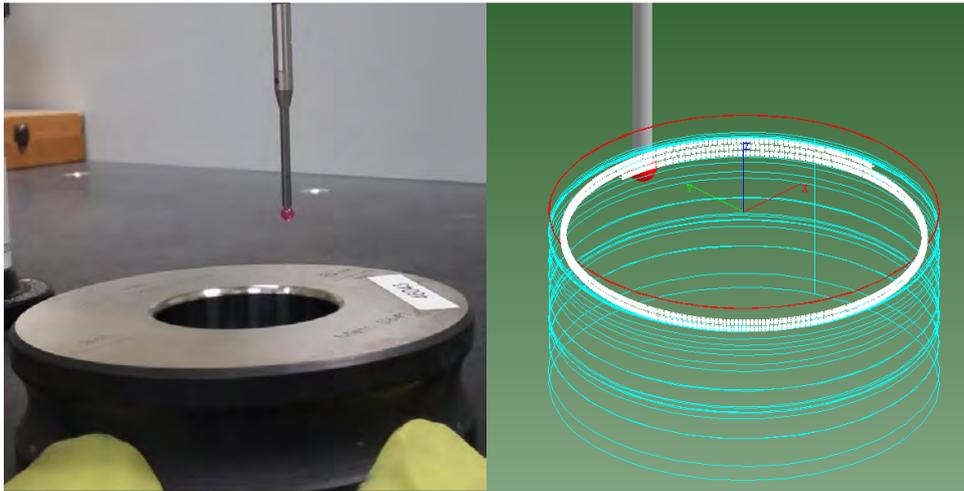


Figure 2. 5 - Montage de la bague sur le marbre et 3D du scan

2.4 Réalisation de Mesures sur une pièce test

Pour la pièce mise en expérimentation dans cette partie d'étude préliminaire, nous avons vérifié les spécifications de la pièce, par une méthodologie mise en place.

Les éléments géométriques à mesurer de la pièce ; plans, cercles. Les droites et les points, sont construits à partir de ceux qui sont mesurés.

2.4.1 Gamme de mesure

Cette gamme prend en compte des spécifications pour la réalisation des mesures de la pièce.

Nous avons suivi la procédure dans l'ordre de la mesure d'éléments, la reconstruction des éléments à l'évaluation des défauts de la manière suivante :

- Mesure des plans A, B, et C de la pièce.
- Construction de la droite d'intersection entre le plan A et le plan B, qui nous a permis de construire le point origine,
- Création du repère pièce, c'est dans ce repère que les spécifications géométriques sont vérifiées,
- Mesure les cercles et définitions ces cercles avec les informations de la CAO,
- Mesure des plans D, et E,
- Evaluation des spécifications,
- Résultats du contrôle.

Le mode opératoire de mesure d'une pièce peut être schématisée par le synoptique ci-dessous de la figure 2.6.

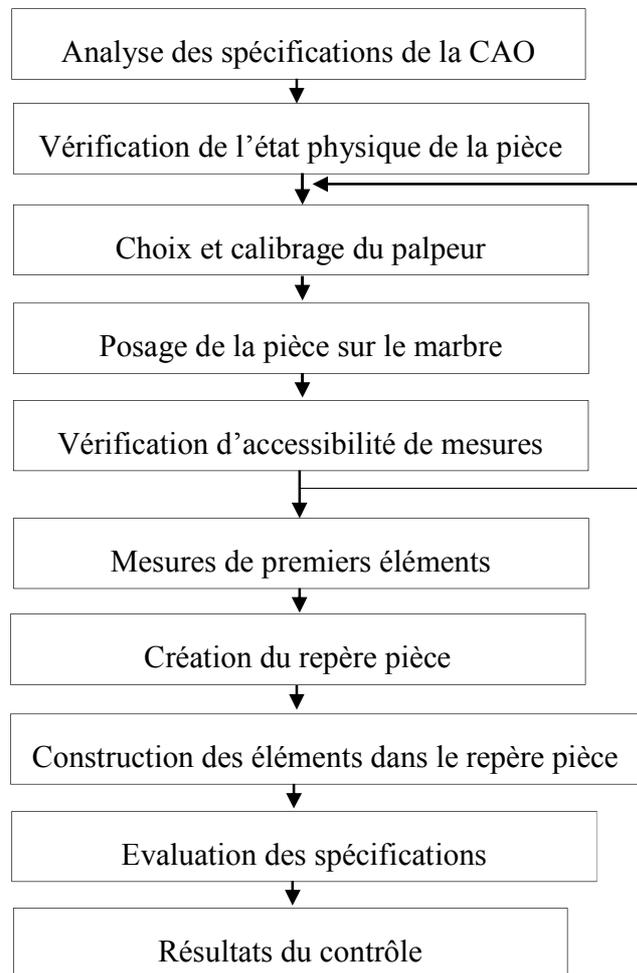


Figure 2. 6 : Mode opératoire de mesures

La figure 2.7, présente le montage de la pièce à contrôler sur le marbre.

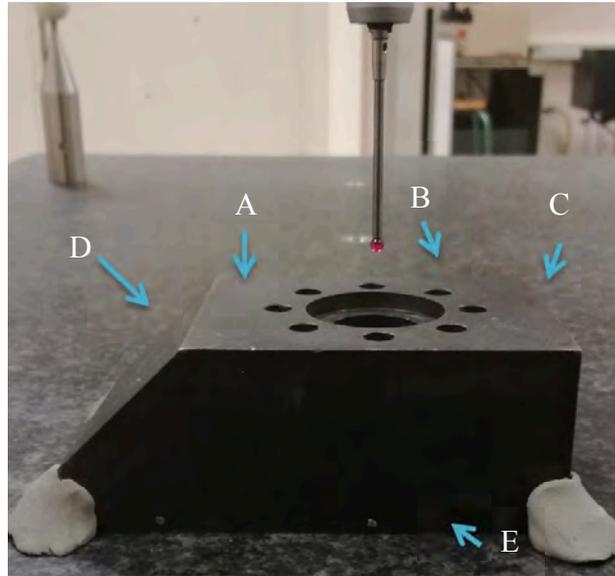


Figure 2. 7 - Gamme de mesure

Après les mesures des éléments, on obtient la représentation en 3D de l'association d'éléments (plans, cercles, droites, repère) de la pièce représentée par la figure 2.8.

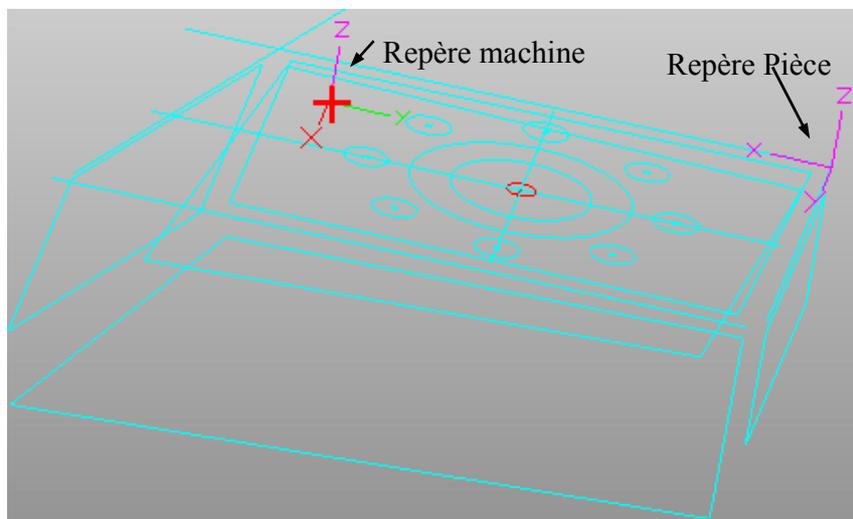


Figure 2. 8 - Représentation de l'association des éléments

Pour les critères de l'association des éléments, et l'évaluation des spécifications, nous avons utilisé le critère des moindres carrés qui sera étudié en détail dans la première partie de l'étude expérimentale.

2.4.2 Résultats de l'Etude préliminaire

Pour obtenir les résultats du tableau 2.2, nous avons mesuré :

- les cinq plans avec 9 points pour chaque plan,
- 12 points. Pour le cercle de diamètre 19.1 mm.

Parmi les spécifications vérifiées nous en présentons quelques-uns dans le tableau 2.2.

Tableau 2. 2- Estimation des écarts

Spécifications	Valeurs nominales	Valeurs mesurées	Ecart
Planéité du plan A(μm)	0,05	0,255	0,205
Perpendicularité du pl B/A (μm)	0	0,023	0,023
Localisation du cercle C1/ pl A (μm)	0	0,107	0,107
Distance entre plan B et E (mm)	59	59,039	0,039

2.5 Conclusion

Pour un contrôle de mesure 3D, il est important de connaître ses moyens de mesure. Il faut surtout de choisir le palpeur approprié, pour la gamme de mesure. La connaissance du critère d'association, est un élément primordial pour l'évaluation de spécifications vérifiées. Si le contrôleur ne choisit pas le critère d'association qui optimise les résultats, les incertitudes de mesures seront importantes. Ce qui impacte la déclaration de conformité des pièces contrôlées.

2.6 Etude expérimentale par mesures physiques d'une pièce test (étalon)

2.6.1 Introduction

Objectif de cette étude expérimentale, est de :

- Mettre en place une méthodologie de contrôle 3D,
- Effectuer des mesures d'éléments de la pièce avec les quatre(4) machines à mesurer tridimensionnelles.
- Evaluer les spécifications définies par le plan de définition et la CAO,.
- Comparer les résultats obtenus de différents logiciels associés aux machines.

2.6.2 Méthodologie : mise en place de la gamme de contrôle

Comme dans le cas de l'industrie de fabrication des pièces mécaniques, en métrologie le contrôle 3D des pièces nécessite une mise en place de la gamme de mesure, permettant d'obtenir des résultats de vérifications des spécifications géométriques des pièces dans l'état de l'art.

L'objectif est de permettre au contrôleur d'effectuer des mesures de pièces sur machines à mesures tridimensionnelles, et d'estimer les incertitudes.

Pour l'instant les normes ne définissent pas de manière claire les étapes du processus de contrôle, et les étapes, de mesures pour l'estimation des incertitudes. Différentes méthodologie de mesures peuvent être utilisées et créer des dispersions sur les résultats de mesure [48].

2.6.2.1 Procédure de mesures

Elle consiste à mesurer des pièces mécaniques sur machine à mesurer tridimensionnelle, il s'agit de vérifier des spécifications géométriques de la pièce en suivant un ordre lié aux éléments.

- Choisir le moyen de mesure 3D en fonction de :
 - de la forme de la pièce, des spécifications à vérifier, et de la qualité de mesure souhaitée,
- Choisir le type de palpeur, pouvant accéder facilement aux différentes surfaces de la pièce, et calibrer le palpeur sur la sphère étalon,
- Choisir une mise en position isostatique et stable de la pièce à mesurer,
- Créer les repères, ou associer les repères pièce pour le dégauchissage avec le repère CAO ,
- Effectuer les mesures, et la construction des systèmes de référence,
- Vérifier les résultats de mesures, comparer avec les valeurs nominales,

Ces différentes étapes, sont présentées dans un organigramme (figure 2.5) servant de tableau de bord du contrôleur.

2.6.2.2 Gamme de mesurage

Elle consiste à présenter, les éléments à mesurer et les spécifications à évaluer dans un ordre chronologique.

Les éléments sont identifiés par deux lettres mnémoniques et le numéro de l'entité défini par ordre chronologique.

Plan (PL), point (PT), cercle(CE), cylindre(CY), droite (DR), et repère (R).

Les points de palpation des éléments sont identifiés sur la pièce et chaque point est désigné par une lettre sur la CAO de la pièce. Cette identification a pour objectif, de permettre à l'opérateur de palper au même endroit pour les mesures des plans, avec toutes les machines, ceci permet de réduire les incertitudes dues aux choix de l'opérateur et aux défauts de la pièce dans les résultats de mesures.

La figure 2.9, présente la pièce étalon MGS avec les plans et points de mesure identifiés.

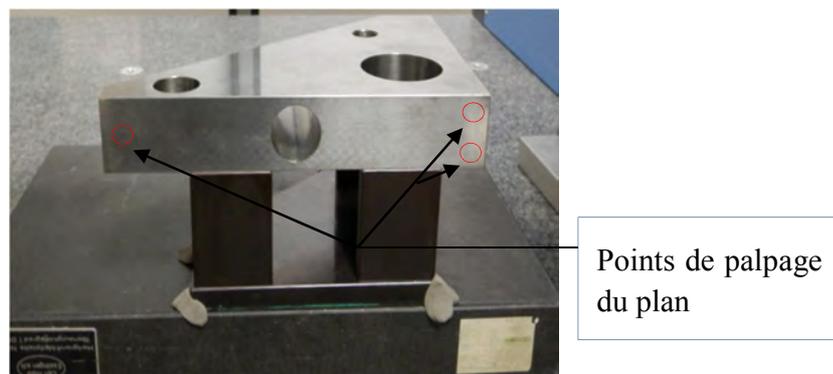


Figure 2. 9 - Pièce étalon

La pièce mise en expérimentation comporte des éléments à mesurer, y sont associées des spécifications géométriques sur le plan de définition (figure 2.12). Les éléments de mesure et les spécifications géométriques à vérifier dans ces expériences sont des angles, distance, diamètre, rectitude, circularité, cylindricité, planéité, et localisation.

Un ordre de palpation des points a été mis en place pour la mesure et la construction des éléments. Le nombre de points et le lieu de palpation sont déterminés par des lettres. De même la construction des éléments projetés, et la création des repères.

Description des différents éléments :

- PL4 palpé en 3 points (a, b, c),
- PL5 palpé en 3 points (d, e, f),
- DR6 intersection de PL4 - PL5 = direction secondaire Y,
- PL7 palpé en 3 points (g, h, i),
- PT8 intersection de PL7 - DR6 = origine,
- Le repère R2 a pour la direction primaire Z la normale au plan PL4, la direction secondaire Y le vecteur associé à la droite DR6 et pour, origine le point PT8,

- PL9 palpé en 3 points (q, r, s),

- PL10 palpé en 3 points (m, n, p),
- PL11 palpé en 3 points (j, k, l),
- Repère R5 = translation de R2 (50, 46, 0),
- CY14 palpé en 8 points (4 points à $Z = -5$ et 4 points à $Z = -32$),
- CY15 palpé en 36 points (12 points à $Z = -5$, 12 points à $Z = -20$ et 12 points à $Z = -32$),
- CE16 palpé en 36 points (à $Z = -5$) projeté dans PL4,
- PL17 (identique à PL4) palpé en 58 points sur toute l'étendue du plan avec une maille de 20 mm, pour évaluer la planéité de ce plan,

Les différents éléments de la pièce en 2D, sont représentés dans la figure 2.10,

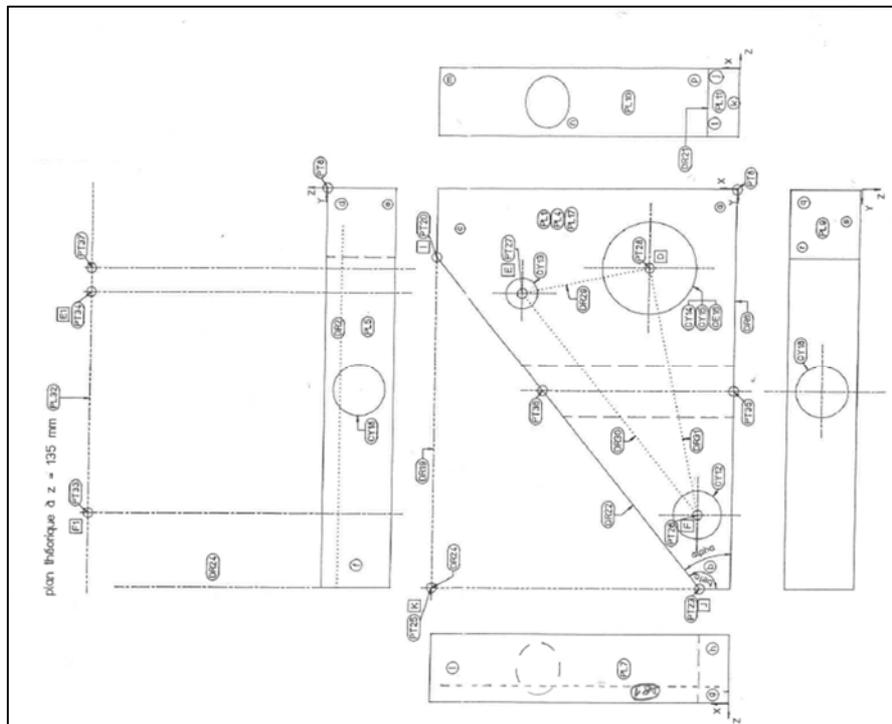


Figure 2. 10 –Désignation des éléments de la pièce expérimentale

2.6.2.3 Evaluation des spécifications géométriques

Les spécifications géométriques présentées, dans cette partie ne sont pas toutes les spécifications de la CAO.

Les mesures sont effectuées trois fois sur chaque machine. Les résultats obtenus par chaque logiciel, à chaque série de mesure sont traités à l'aide d'une moyenne et l'étendue pour chaque spécification vérifiée. Dans cette partie, nous présentons la liste non exhaustive des éléments géométriques [32,33], [42,-45] de la pièce soumise au contrôle :

- Distance,
- Angle entre plans,
- Diamètre,
- Cylindricité,
- Circularité,
- Planéité.

2.6.2.4 Répétabilité et reproductibilité des mesures

La répétabilité et la reproductibilité de mesures, sont définies par le vocabulaire international de métrologie, concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM 200:2012, 3^{ème} édition) [1].

La répétabilité est la fidélité des mesures selon un ensemble de conditions de réalisation. Les conditions comprennent la même procédure de mesure, les mêmes opérateurs, le même système de mesure, les mêmes conditions de fonctionnement et le même lieu, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires pendant une courte période de temps.

La reproductibilité est la fidélité des mesures selon un ensemble de réalisation. La reproductibilité, les conditions comprennent des lieux, des opérateurs et des systèmes de mesure différents, ainsi que des mesurages répétés sur le même objet ou des objets similaires.

Afin de respecter toutes les conditions, nous avons mis un mode opératoire unique, et nous avons effectué trois mesures de la pièce étalon sur chaque machine à mesurer tridimensionnelle.

2.6.3 Résultats de mesures

Les valeurs évaluées de spécifications par les logiciels sont listées dans des tableaux pour chaque machine, ensuite les valeurs sont comparées dans des histogrammes, spécification par spécification.

Les éléments mesurés en 3D sont représentés dans la figure 2.11, et les résultats obtenus par les différents moyens de mesures sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

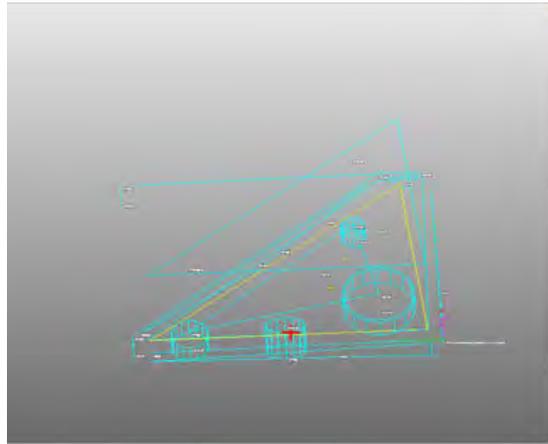


Figure 2. 11 - Représentation en 3D des éléments associés

2.6.3.1 Identification des principales sources d'incertitudes

Dans un processus de mesures 3D d'une pièce, il est nécessaire de connaître les différents paramètres qui peuvent influencer les résultats de mesures. Pour ce faire nous allons tracer le diagramme 5M. Ceci permettra d'identifier les différentes sources d'incertitudes.

Les principales sources d'incertitudes d'une mesure proviennent essentiellement des paramètres suivants :

- La Matière(Pièce),
- Le Moyen (MMT),
- La Méthode,
- La Main d'œuvre,
- Le Milieu.

A chacune de ces principales sources d'incertitudes, un nombre des facteurs d'influences dans les résultats de mesures sont associés. En premier temps, nous nous focalisons à la définition de ces 5 principales sources d'incertitudes de mesures, ensuite nous les présentons sur le diagramme de 5M avec quelques facteurs d'influence.

La matière

La qualité géométrique des éléments de la pièce à mesurer induisent une dispersion dans les résultats de mesure.

Les moyens

Les différentes composantes (géométrie, palpeur, règle de mesure) de la machines induisent des erreurs de mesures.

Main d'œuvre

La maîtrise des moyens matériels et logiciels MMT par l'opérateur, sa compétence, et son expérience influent les résultats de mesures.

Méthodes

Les méthodes mises en œuvre pour mesurer la pièce et évaluer les caractéristiques ont une influence notable sur les résultats de mesures.

Le Milieu

Les conditions thermiques et hygrométriques induisent des erreurs de mesures.

Le diagramme 5M ou diagramme « causes et effets », est une représentation graphique des causes d'incertitudes de mesure. La figure 2. 12, montre une liste assez exhaustive des paramètres susceptibles d'influencer l'incertitude de mesure 3D.

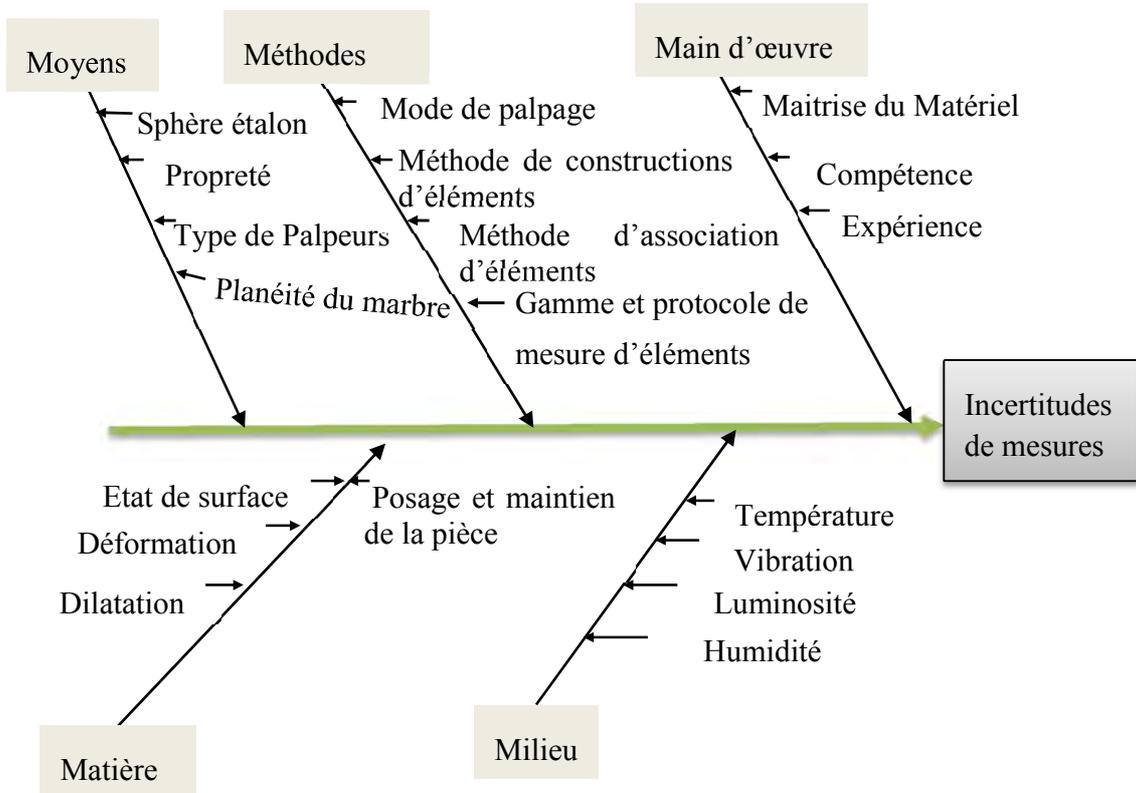


Figure 2. 12 - Diagramme de 5M, les principales sources d'incertitudes et facteurs d'influences

2.6.3.2 Différence entre erreur de mesure et incertitudes sur la mesure

Les mesures ne sont pas rigoureusement exactes. Toute mesure est entachée d'erreur. Il existe une nuance paradoxale entre l'incertitude de mesure et l'erreur de mesure. L'incertitude est une indication de la qualité des résultats de mesure, elle exprime toutes les erreurs non corrigées, alors que l'erreur de mesure est la différence entre la valeur mesurée et la valeur vraie. Lorsqu'on évalue les erreurs expérimentalement et que les corrections appropriées sont appliquées, il reste encore une incertitude sur la validité du résultat annoncé [46], cette différence est montrée dans le schéma explicatif de la (figure 2.13).

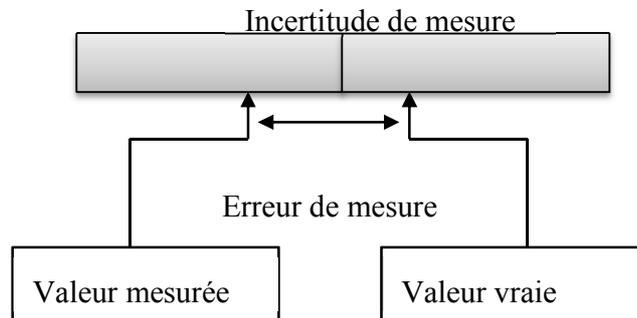


Figure 2. 13- Illustration de la différence entre l'erreur de mesure et l'incertitude de mesure [46]

2.6.3.3 Résultats expérimentaux

Les résultats de mesures des éléments géométriques, et des spécifications contrôlées sont résumés sur les figures ci-dessous.

Dans le tableau 2.3, on présente les résultats de mesures obtenus à l'aide du logiciel Metrolog XG 06, associé à la machine à mesure tridimensionnelle manuelle Tri-mesure, et les étendues calculées.

Tableau 2. 3 - Estimation des écarts de résultats du logiciel Metrolog XG 06, associé à la machine Tri-mesure

Spécifications	Valeur nominale	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Moyenne	Etendues
Distance (mm)	165	165,078	165,057	165,059	165,064	0,012
Angle (degrés)	129	128,731	128,753	128,724	128,736	0,015
Diamètre (mm)	54	54,020	54,005	54,009	54,011	0,008
Cylindricité (mm)	0	0,024	0,003	0,003	0,010	0,012
Circularité (mm)	0	0,035	0,038	0,039	0,037	0,002
Planéité (mm)	0	0,004	0,004	0,0030	0,003	0,001

Le tableau 2.4, présente les résultats de mesures des éléments géométriques, des spécifications géométriques obtenus du logiciel Metrolog XG 13, associé à la machine à mesure tridimensionnelle Zeiss, et les étendues de ces résultats.

Tableau 2. 4 - Estimation des écarts de résultats du logiciel Metrolog XG 13 associé à la machine Zeiss

Spécification	Valeurs nominales	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Moyenne	Etendues
Distance (mm)	165	165,069	165,070	165,070	165,069	0,001
Angle (degrés)	129	128,744	128,728	128,736	128,736	0,008
Diamètre (mm)	54	54,017	54,018	54,018	54,017	0,001
Cylindricité (mm)	0	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001
Circularité (mm)	0	0,003	0,007	0,003	0,004	0,002
Planéité (mm)	0	0,005	0,004	0,004	0,004	0,001

Le tableau 2.5, montre les résultats des mesures des spécifications géométriques obtenus avec le logiciel Cosmos 2.4, de la machine à mesurer tridimensionnelle Mahr K-Mess.

Tableau 2. 5- Estimation des écarts de résultats du logiciel Cosmos 2.4, associé à la machine Mahr K-Mess

Spécifications	Valeurs nominales	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Moyenne	Etendues
Distance (mm)	165	165,074	165,069	165,073	165,072	0,003
Angle (degrés)	129	128,444	128,445	128,441	128,443	0,002
Diamètre (mm)	54	54,013	54,013	54,015	54,013	0,001
Cylindricité (mm)	0	0,011	0,006	0,008	0,008	0,004
Circularité (mm)	0	0,006	0,006	0,010	0,007	0,002
Planéité (mm)	0	0,003	0,008	0,003	0,004	0,003

Dans le tableau 2.6, nous présentons les résultats obtenus à l'aide du logiciel CMM Manager, associé à la machine à mesure tridimensionnelle LK Nikon de mesures des éléments géométriques.

Tableau 2. 6 - Estimation des écarts de résultats du logiciel CMM Manager, associé à la machine LK Nikon

Spécifications	Valeurs nominales	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 3	Moyenne	Etendues
Distance (mm)	165	165,073	165,073	165,073	165,073	0,001
Angle (degrés)	129	128,738	128,738	128,739	128,738	0,000
Diamètre (mm)	54	54,020	54,020	54,020	54,020	0,000
Cylindricité (mm)	0	0,004	0,004	0,004	0,004	0,000
Circularité (mm)	0	0,006	0,006	0,006	0,006	0,001
Planéité (mm)	0	0,003	0,003	0,003	0,003	0,000

2.6.3.4 Inter comparaison des résultats de mesures

Le but recherché dans ce chapitre est de voir la contribution du logiciel dans l'incertitude dans des résultats. En effectuant des calculs d'écarts entre les valeurs nominales et les valeurs mesurées, obtenues par répétabilité et reproductibilité de mesures des différents moyens de mesures. Ensuite les résultats des spécifications contrôlées par les différents logiciels sont comparés.

L'histogramme de la figure 2.14 illustre une comparaison des résultats de mesures de la distance nominale (165 mm) entre deux points, obtenus par les logiciels.

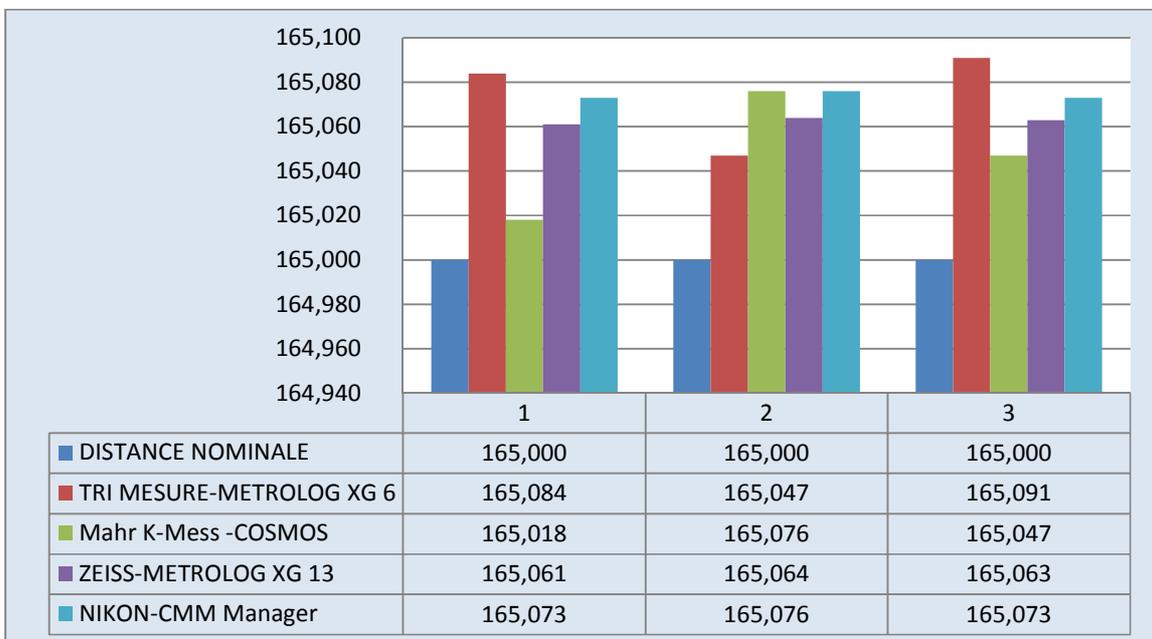


Figure 2. 14 - Distance (165 mm) entre deux points

La figure 2.15, présente des résultats de mesure d'un angle de 129°, entre deux plans. Les résultats obtenus sont loin de la valeur nominale.

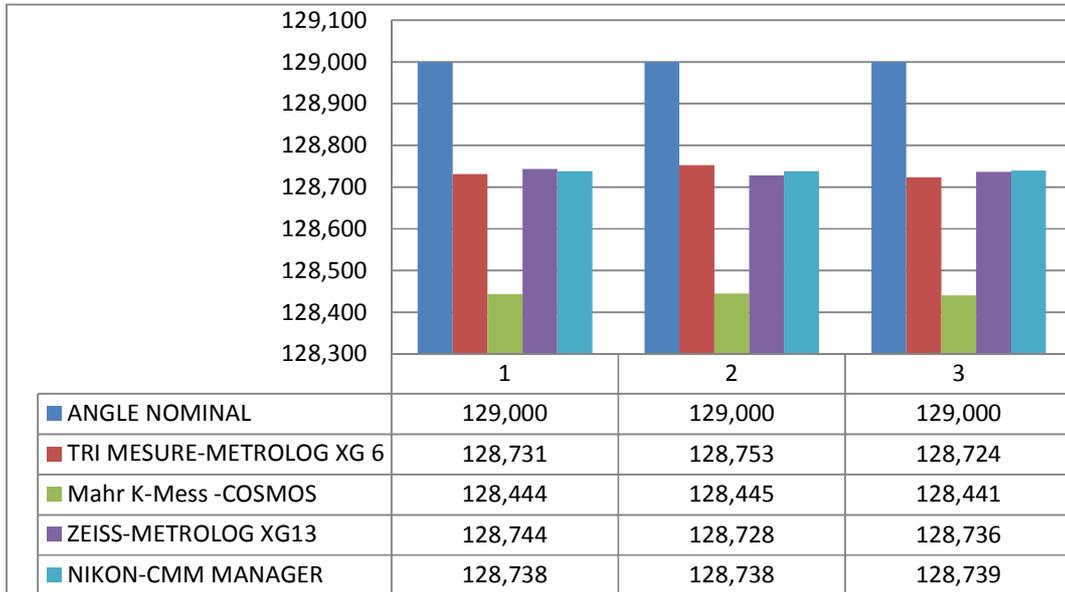


Figure 2. 15 - Comparaison des résultats de mesures de l'angle, obtenus par les différents logiciels, et avec la valeur nominale.

La cylindricité du cylindre de diamètre 54 mm évaluée dans cette partie de thèse, par les divers moyens de contrôle 3D, est comparée par dans la figure 2.16.

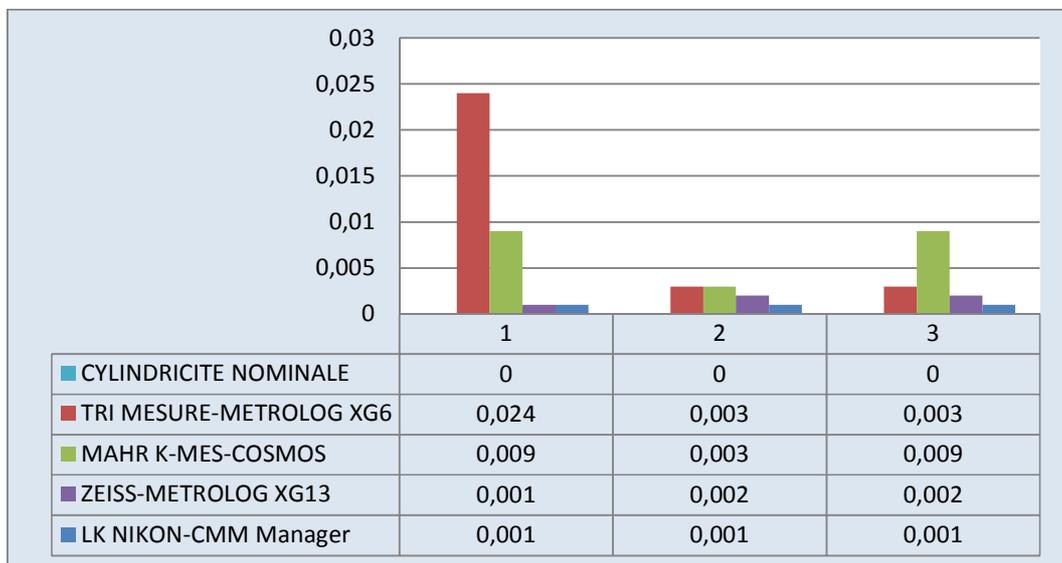


Figure 2. 16 - Cylindricité du cylindre de 54 mm évaluée par les différents logiciels

La circularité du cylindre de diamètre 54 mm, qui a fait l'objet d'évaluation par les différents logiciels, est comparée dans la figure 2.17.

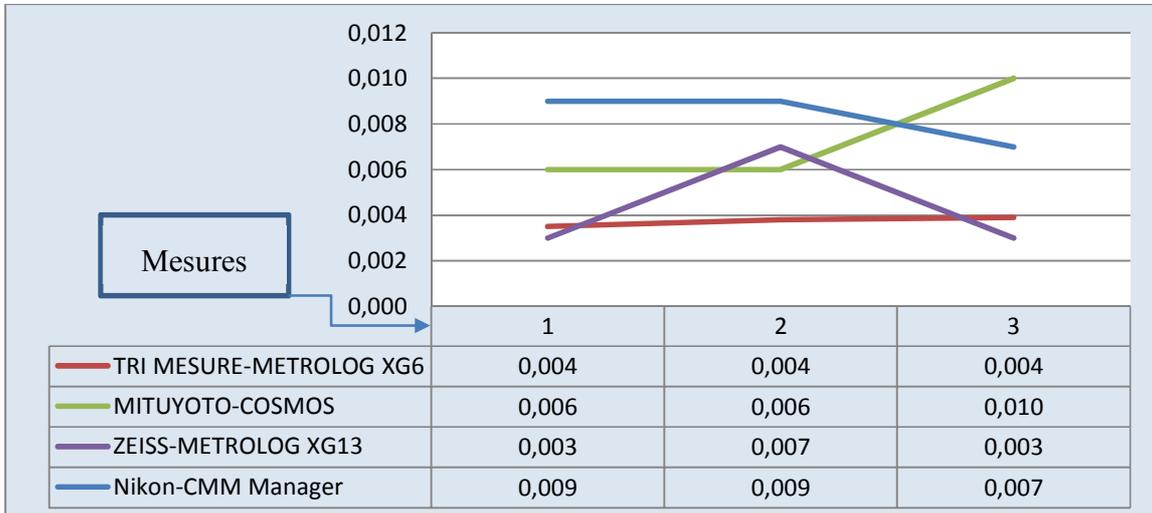


Figure 2. 17 - Comparaison de la circularité du cercle de 54 mm

La planéité représentant la qualité de la surface de la pièce étalon, évaluée est représentée par la figure 2. 18.

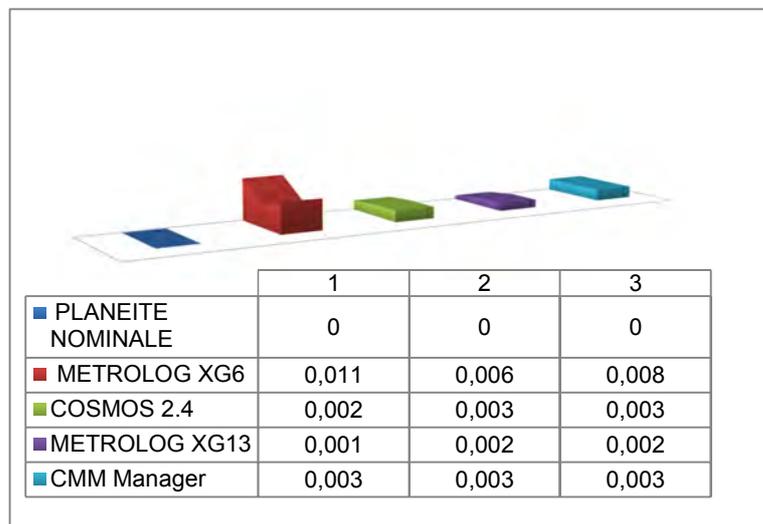


Figure 2. 18 - Comparaison de la planéité de la pièce étalon évaluée par les logiciels,

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude expérimentale de mesures sur une pièce étalon. Dans premier temps une étude préliminaire a été réalisée sur deux types de pièces, afin de vérifier les qualifications des palpeurs, pour ce faire une gamme de mesure et un mode opératoire ont été mis en place. Pour les mesures de la pièce étalon, nous avons utilisé quatre(4) machines à mesurer tridimensionnelles avec trois(3) logiciels différents, ce pendant nous avons présenté brièvement les critères d'association des éléments géométriques, dans les options des logiciels associés aux MMTs, la méthode de critère des moindres carrés a été retenue pour l'évaluation des spécifications géométriques. Nous avons aussi développé une méthodologie, dans laquelle mises en place une gamme de contrôle et une procédure de mesure pour l'évaluation des spécifications par les différents logiciels. La répétabilité et reproductibilité de mesure ont été définies et appliquées dans ces mesures.

Les principales sources d'incertitudes d'un processus de mesure sont présentées dans le diagramme de 5M, ainsi que les facteurs susceptibles d'influencer le résultat de mesure. Les résultats obtenus des différentes mesures sont présentés et comparés avec les valeurs nominales, les étendues sont estimées par élément mesuré ou spécification vérifiée. Et enfin une inter comparaison de résultats de mesures de différents logiciels est réalisée. On remarque que dans les résultats qu'il existe des différences significatives des valeurs d'un logiciel à un autre, bien que les conditions de mesure du laboratoire, les conditions répétabilité et de reproductibilité, ainsi que la procédure et le mode opératoire sont respectés. L'hypothèse de la contribution de la partie logicielle dans les résultats de mesures 3D, semble se confirmer, dans cette partie des mesures, mais il faut évaluer d'autres spécifications plus complexes des pièces en utilisant les nuages des points, pour confirmer l'influence due aux outils logiciels dans les résultats de mesure lors de contrôle 3D. Dans le chapitre 3, nous allons construire deux types de pièces géométriques, à l'aide de nuages des points et évaluer les spécifications géométriques par les logiciels de mesures 3D.

Chapitre 3

Etude expérimentale « étalon logiciel » et « mesures virtuelles ».

Sommaire

3.1	Introduction.....	57
3.2	Objectifs.....	57
3.3	Présentation des pièces.....	57
3.4	Choix des logiciels.....	57
3.5	Critères d'association d'éléments géométriques.....	58
3.5.1	Le critère minimax, ou le critère de Tchebychev.....	58
3.5.2	La méthode de moindres carrés.....	58
3.6	Méthodologie.....	60
3.6.1	Procédure de mesure.....	60
3.6.2	Conversion du fichier des points au format logiciel.....	61
3.6.3	Identification des éléments de construction.....	62
3.6.4	Evaluation des Spécifications.....	63
3.6.5	Choix du critère d'association.....	63
3.7	Programme de mesure de pièces.....	64
3.8	Résultats de mesures du premier type de pièce.....	64
3.9	Conclusion.....	67
3.10	Facteurs d'influences dans les résultats de mesures 3D : Logiciels associés aux machines à mesurer tridimensionnelles.....	68
3.10.1	Objectif.....	68
3.10.2	Etude expérimentale.....	68
3.10.3	Présentation du type de pièce.....	68
3.10.4	Programme de mesure.....	69
3.10.5	Résultats et Discussion.....	72

3.10.6	Proposition d'un diagramme 5M de mesures virtuelles.....	77
3.10.7	Conclusion.....	77
3.10.8	Conclusion.....	78

3.1 Introduction

Ce chapitre, fait l'objet des études expérimentales de mesures virtuelles contrairement au chapitre précédent qui a fait l'objet l'étude de mesures physiques. Les mesures virtuelles, elles consistent à la construction des pièces à l'aide de nuage de points. Nous disposons pour cette étude expérimentale comme moyens de mesure, les logiciels de moyens de mesure 3D, De ce fait, cette partie de mesures virtuelles, concerne uniquement du traitement logiciel. La construction de deux types de pièces 3D à l'aide des nuages des points.

3.2 Objectifs

L'objectif premier de cette partie, est la mise en place d'une méthodologie permettant la réalisation des mesures des pièces virtuelles avec les différents logiciels, et ensuite suivre la même procédure et programme d'évaluation des spécifications géométriques et comparer les résultats obtenus de logiciels. Vérifier aussi l'hypothèse posée par l'objet de l'étude de la première partie expérimentale de la thèse.

3.3 Présentation des pièces

Les pièces à construire dans cette partie de l'étude, sont de deux types, les pièces du premier type chacune est constituée par un ensemble de points, et les pièces du deuxième type chacune est constituée par un ensemble de 93 points. Les pièces présentent des défauts géométriques qui seront détectés par les logiciels. Pour chaque type un nombre des pièces est sélectionné pour les mesures virtuelles.

3.4 Choix des logiciels

Le choix du logiciel, est un élément important pour les mesures 3D, la connaissance des possibilités du logiciel s'avère primordiale, [5], [39], en particulier pour les mesures virtuelles. Cependant nous retenons trois logiciels, qui ont plus de possibilités d'option permettant de construire et d'évaluer des spécifications plus complexes. Ces logiciels sont associés aux machines à mesurer tridimensionnelles, présentés dans le tableau 3.1, dans le processus de mesure de pièces virtuelles, le logiciel est élément par lequel toutes les mesures sont réalisées, donc une erreur due au logiciel entraine des résultats aberrants de mesures.

Tableau 3. 1 -Logiciels utilisés

logiciel	Version
Metrolog XG	XG 13 (10/2010)
Metrolog XG	XG 14 (12/2013)
CMM Manager	3.5 (04/2015)

3.5 Critères d'association d'éléments géométriques

Le critère d'une association est défini par un objectif selon le cas des contraintes. Utiliser un critère d'association lors d'un contrôle 3D, c'est trouver la surface parfaite, qui représente le mieux le nuage des points palpés sur une surface réelle. Il existe de nombreux critères d'association d'éléments, ici le choix sera porté sur le résultat qu'à donner le critère.

3.5.1 Le critère minimax, ou le critère de Tchebychev

Le critère minimax, ou le critère de Tchebychev, permet de minimiser la plus grande valeur, ou de maximiser la plus petite valeur, est mieux adapté lorsque le nombre des points mesurés est important, minimise la distance maximale, et peut générer de résultat aberrant quand le nombre de points mesurés n'est pas important.

La figure 3.1, illustre plan et cylindre minimax, indiqués par les flèches.

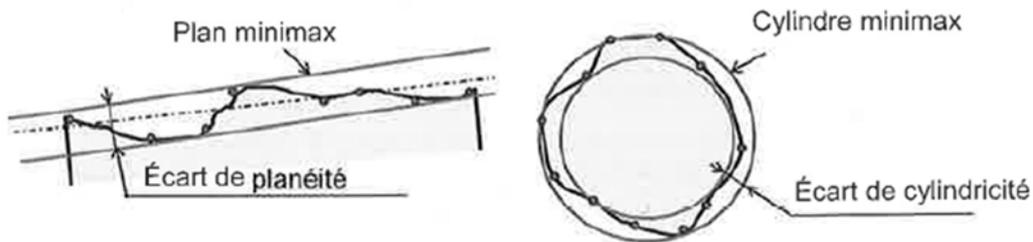


Figure 3. 1 -Plan minimax et Cylindre minimax [49]

3.5.2 La méthode de moindres carrés

Le critère de moindres carrés, est un critère qui permet d'associer un élément idéal à un nuage des points, minimise la somme de carrés des écarts (cf équation 3.1) au carré des points à l'élément idéal, quel que soit le nombre des points, et quel que soit le l'étendue de la surface mesurée [29], [40], [47], [49], ce critère a l'avantage par rapport aux autres critères étudiés de donner de résultat robuste et fiable.

Le critère de moindre carrés est de définie par l'équation suivante :

$$W = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (3.1)$$

$$w = \sum_{i=1}^n (\xi_i - (T_o \otimes P h_i))^2 \quad (3.2)$$

$$w = \sum_{i=1}^n (\xi_i - (u.a_i + v.b_i + w.c_i + \alpha.L_i + \beta.M_i + \gamma.N_i))^2 \quad (3.3)$$

W est une fonction à 6 variables $W=f(u, v, w, \alpha, \beta, \gamma)$.

On obtient 6 équations linéaires à l'aide des dérivées partielles par rapport aux 6 inconnues :

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial u} = 0 & \quad \frac{\partial W}{\partial v} = 0 & \quad \frac{\partial W}{\partial w} = 0 \\ \frac{\partial W}{\partial \alpha} = 0 & \quad \frac{\partial W}{\partial \beta} = 0 & \quad \frac{\partial W}{\partial \gamma} = 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

La connaissance de $u, v, w, \alpha, \beta, \gamma$ permet ensuite de calculer dans le repère local lié à la surface nominale, la nouvelle position des points théoriques définissant la position initiale de l'élément géométrique nominal et de connaître enfin dans le repère de calcul (ou repère machine), la situation de l'élément géométrique associé à l'ensemble des points palpés. Il est également possible de calculer maintenant, les écarts optimisés (e_i) entre les points palpés et l'élément géométrique optimisé.

La figure 3.2 représente en trait discontinu, le plan et le cercle des moindres carrés.



Figure 3.2 -Plan et Cercle des moindres carrés [49]

La méthode des moindres carrés, est implantée dans les logiciels actuels de MMT, pour définir un élément géométrique parfait, il faut seulement $N+1$ nombre de points palpés, avec N le nombre minimum de points pour pouvoir calculer un élément associé celui-ci sera plus ou moins représentatif de l'élément réel.

Notre choix est porté sur le critère de moindres carrés, pour l'association des éléments géométriques et l'évaluation des spécifications géométriques, tout au long de ce travail.

3.6 Méthodologie

La méthodologie est de mettre en place une procédure de mesure, pour les mesures virtuelles des pièces, pour les logiciels choisis dans l'inter comparaison de logiciels associés aux machines à mesurer tridimensionnelles. La méthodologie proposée pour réaliser les mesures virtuelles comprend les étapes des paragraphes ci-dessous.

3.6.1 Procédure de mesure

Pour toute mesure, il est nécessaire d'analyser l'objet à étudier. Cette procédure permet à l'opérateur de suivre les étapes de réalisation des mesures virtuelles. C'est un outil indispensable dans ce domaine des mesures 3D. Nous avons schématisé cette procédure dans un organigramme de mode opératoire.

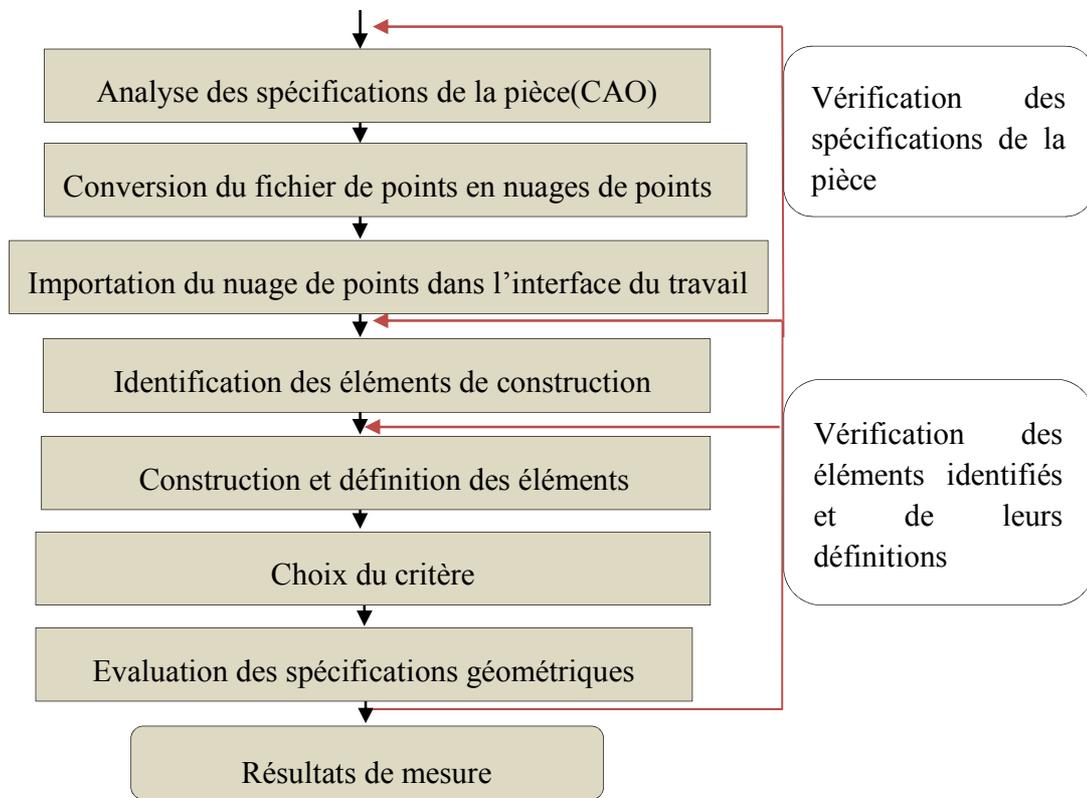


Figure 3. 3 - Procédure de mesure

L'analyse des spécifications géométriques de la pièce, nécessite une bonne connaissance et maîtrise du langage de cotation des normes ISO. C'est à partir de cette analyse qu'on détermine toutes les surfaces tolérancées, la construction des systèmes de références, et qu'on juge du résultat de mesure. [49].

3.6.2 Conversion du fichier des points au format logiciel

Il consiste à convertir les points palpés obtenus au format pnt ou txt, au format logiciel. Pour ce faire nous avons utilisé une macro sous Excel pour la conversion au format logiciel. Le type de fichier à convertir est présenté par la figure 3.1.

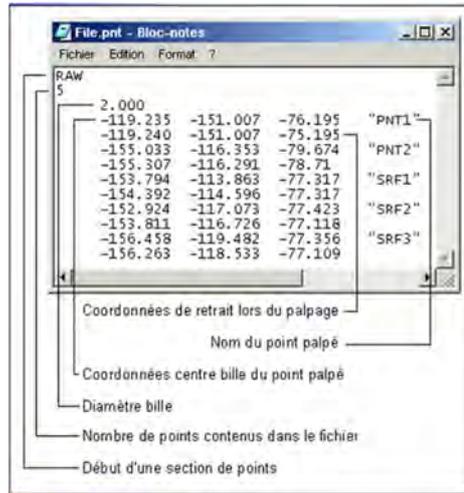


Figure 3.4 -Type de fichier

Les points convertis forment les nuages de points, constituant les pièces à construire, nous avons identifié chaque élément de la pièce par le nuage des points qui le constitue, nous présentons le nuage de points obtenu par la figure 3.2.

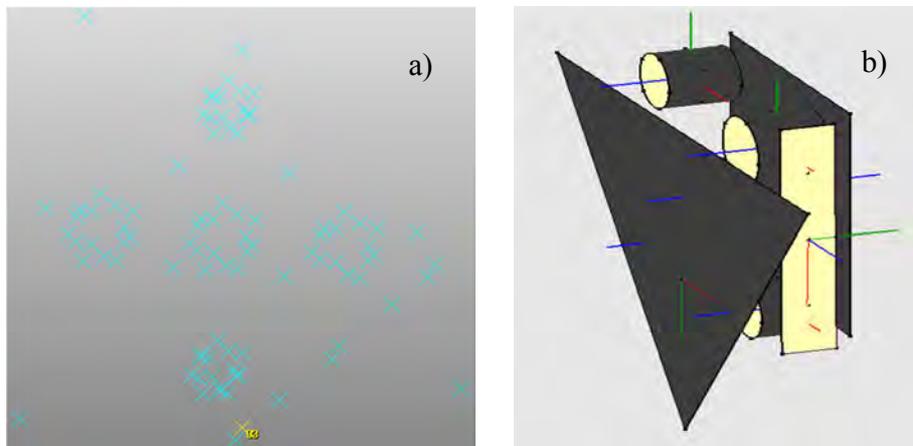


Figure 3.5 -Nuage des points (a), CAO 3D de la pièce à construire (b)

3.6.3 Identification des éléments de construction

L'identification des éléments consiste à identifier tous les points de chaque élément de la pièce virtuelle, cette étape est délicat pour la suite du travail à faire, les premiers éléments à identifier sont le plan du marbre et les plans de la pièce. Les éléments suivants sont identifiés :

- Le Plan du marbre,
- Deux Plans de la pièce,
- Cinq cylindres,

Ces éléments sont constitués par le nuage des points comme suit :

Plan du marbre : du point 83 à 85,

Plan A : du point 1 à 8,

Plan B : du point 86 à 93,

Cylindre 1 : du point 9 à 23,

Cylindre 2 : du point 24 à 38,

Cylindre 3 : du point 39 à 53,

Cylindre 4 : du point 54 à 67,

Cylindre 5 : du point 68 à 82,

3.6.4 Evaluation des Spécifications

Pour pouvoir effectuer des évaluations de spécifications géométriques des éléments, et estimer les incertitudes de mesure dans l'art, il est important de recenser toutes les spécifications géométriques à vérifier de la pièce. Les spécifications qui sont évaluées, dans cette partie de l'expérience sont recensées de la manière suivante :

La perpendicularité du plan B par rapport au plan A,

Evaluation des distances de points 86 à 93 avec le plan B défini,

Evaluation des localisations des axes de cinq (5) cylindre dans le plan A.

3.6.5 Choix du critère d'association

Il existe des nombreux critères d'association d'éléments, certains sont développés théoriquement dans des algorithmes sans être implémentés dans les logiciels, d'autres décrits dans la littérature scientifique. Il est impératif de connaître les critères requis par les normes de cotation que le logiciel dispose, puisque tous les logiciels [choix d'un logiciel de contrôle 3D] ne disposent pas tous les critères.

Les critères choisis dans cette partie des expériences sont disponibles dans les logiciels utilisés.

Le critère de moindres carrés est appliqué pour la construction d'éléments et évaluation des spécifications, mais le critère inscrit est utilisé pour la définition des cylindres pour servir des éléments de référence.

3.7 Programme de mesure de pièces

Un programme de mesure a été réalisé, en respectant la procédure de mesure définie, pour les mesures de ce type de pièces. Ce programme réalisé est unique à tous les logiciels, il consiste aux étapes suivantes :

- Importer le fichier de points convertis (nuages de points), et identification des éléments de la pièce,
- Construction du plan du marbre,
- Construction du plan A,
- Construction du plan B,
- Définir le plan B perpendiculaire au plan A,
- Construction de la droite AB,
- Construction des cylindres,
- Construction des points des intersections des axes de cinq cylindres avec le plan A,
- Définir le repère AB,
- Construire le point origine AB (par projection du point d'intersection, Cyl2/A sur le plan B),
- Construire une droite d'intersection cyl1-cyl2,
- Construire un point centre C médian cyl1-cyl2,
- Construire le repère AC et définir,
- Définir les plans (A et B),
- Définir les cylindres,
- Evaluer la perpendicularité du plan B par rapport au plan A,
- Evaluer les spécifications géométriques.

3.8 Résultats de mesures du premier type de pièce

Les résultats obtenus de différentes mesures virtuelles de pièces, sont présentés dans des tableaux par spécification géométrique évaluée par les logiciels, où nous effectuons une inter-comparaison des logiciels à travers de ces résultats. Dans l'annexe I nous présentons ces résultats avec des résultats obtenus par logiciels de mesure 3D d'autres laboratoires qui ont effectué de mesures sur ces pièces. Pour but de réaliser une comparaison inter-laboratoires des moyens de mesure logiciels de métrologie 3D.

Les écarts de la perpendicularité du plan B des pièces choisies, évalués par rapport au plan A, sont représentés dans la figure 3.6

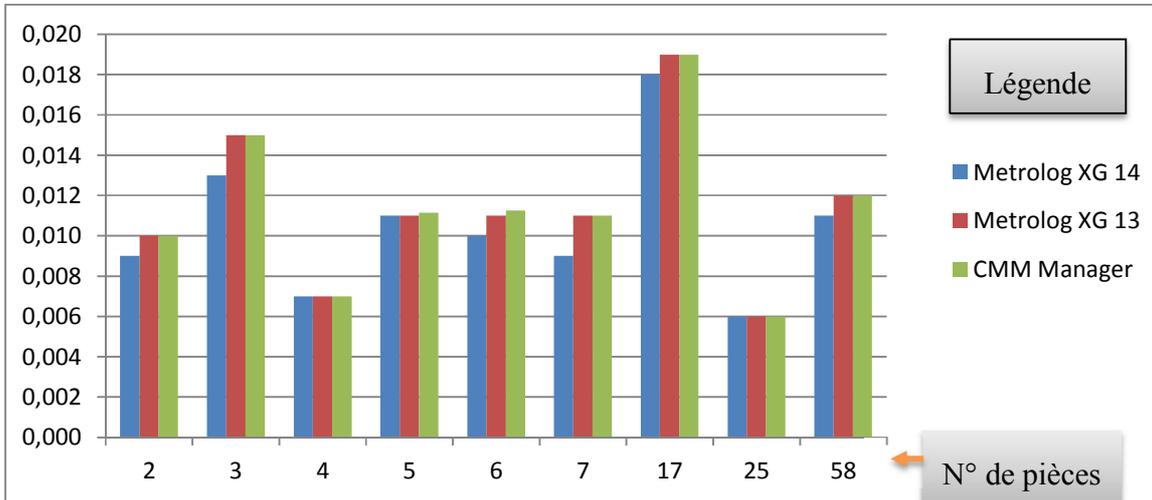


Figure 3. 6 - Résultats de mesure de perpendicularité

Dans la figure 3.7, nous présentons les résultats d'évaluation de la localisation de l'axe du cylindre 1 de différentes pièces dans le plan A.

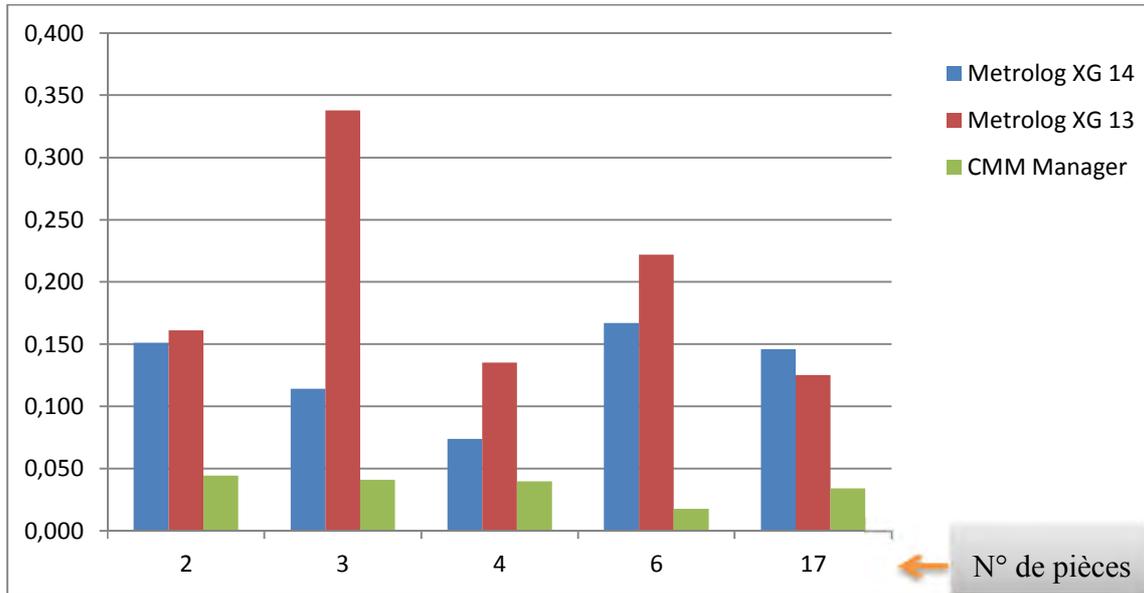


Figure 3. 7 - Localisation de l'axe du cylindre 1

Dans la figure 3.8, nous présentons les résultats d'évaluation des localisations de l'axe du cylindre 2 de chaque pièce dans le plan A.

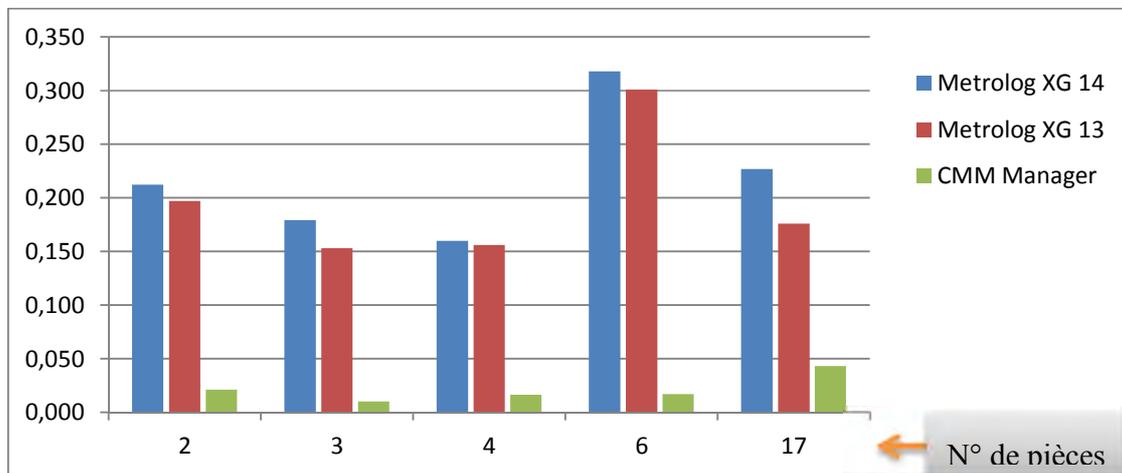


Figure 3. 8 - Localisation de l'axe du cylindre 2

Les résultats de la localisation de l'axe du cylindre 3, obtenus par les logiciels sont présentés dans la figure 3.9

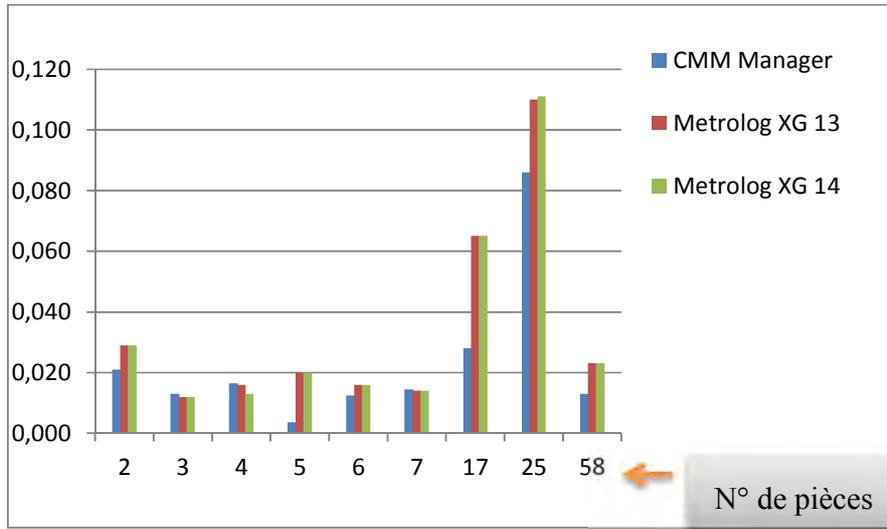


Figure 3. 9 -Localisation de l'axe du cylindre

3.9 Conclusion

Dans cette partie des travaux nous avons présenté brièvement le type de pièces virtuelles à construire à partir de nuage de points. Il a été développé, une méthodologie de mise en place de procédure de mesures virtuelles, par une programmation unique à tous les logiciels, les spécifications géométriques ont été évaluées par trois logiciels, ensuite nous avons fait une intercomparaison des résultats de mesures obtenus de logiciels, sur certaines pièces les logiciels ont des résultats identiques, par contre sur d'autres les résultats différent sur une même spécification vérifiée. On constate que les logiciels n'obtiennent pas tous les mêmes valeurs pour un élément géométrique d'une même pièce.

La problématique que pose le sujet de notre recherche a une importance capitale pour les laboratoires de métrologie utilisant les logiciels associés aux MMT. Dans la partie qui suit nous allons faire des mesures virtuelles sur d'un autre type de pièces, c'est qui permet de vérifier l'hypothèse plus approfondie, et aussi de présenter dans le diagramme de 5M les différents paramètres influents dans l'incertitude de la partie logicielle.

3.10 Facteurs d'influences dans les résultats de mesures 3D : logiciels associés aux machines à mesurer tridimensionnelles

3.10.1 Objectif

Dans cet article nous nous focalisons à l'étude de la problématique posée dans l'introduction de ces travaux de recherche. Le logiciel peut être un facteur d'influence dans les résultats de mesures. Les résultats de cet expérience aux contrôleurs de moyens de mesures 3D de se rendre compte de l'estimation des incertitudes de mesures et l'influence du logiciel dans les résultats de mesures. Pour ce faire, nous réalisons des mesures virtuelles avec les logiciels de mesure 3D sans les machines. Et les résultats sont comparés avec les valeurs nominales.

Nous utilisons deux de logiciels différents de mesure 3D, pour la construction des pièces virtuelles à partir de nuage de points. Pour pouvoir analyser les résultats de mesures, nous avons mis en place une procédure unique et une seule méthode d'évaluation pour tous les logiciels. Afin de mesurer les écarts de forme, d'orientation, et d'éléments géométriques, un d'ordre d'éléments est respecté dans le programme.

3.10.2 Etude expérimentale

L'objet de l'étude expérimentale, consiste à construire des éléments géométriques d'une pièce virtuelle et vérifier les spécifications géométriques par une même méthode et un même programme de mesures sur les différents logiciels de mesure 3D, puis comparer avec les valeurs nominales. Les résultats de cet expérience permettent de confirmer ou non que le logiciel peut être un facteur d'influence dans les résultats. La figure 3.1, présente la conception en 3D de la pièce expérimentale.

3.10.3 Présentation du type de pièce

Le type de pièce à mesurer dans ce paragraphe, est représenté dans la figure 3. 10,

Dans cette figure, les éléments à construire à partir du nuage de points, sont aussi indiqués par les flèches. Il s'agit des plans, cylindres, et aussi des droites et des droites construits à partir ces derniers. Les fichiers des points sont mis dans l'annexe II de ce travail.

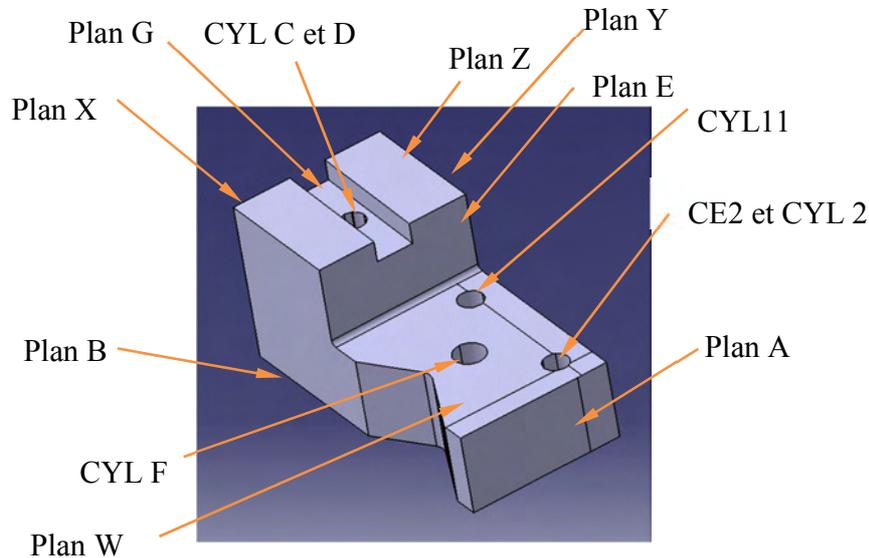


Figure 3.10 – CAO de la pièce à construire

3.10.4 Programme de mesure

Le programme de mesure a été réalisé, en respectant la procédure de mesure définie précédemment, pour les mesures de ce type de pièces, le programme est à appliquer sur tous les logiciels, il consiste aux étapes suivantes :

Importation de points,

Identification des éléments de construction,

Construction des éléments (plans, droites, points),

Création du repère pièce,

Construction des éléments type cylindre,

Evaluation des spécifications géométriques.

L'ordre de construction des éléments dans le programme est suivi comme suit :

Construction du plan X,

Construction du plan Y,

Construction du plan Z,

Construction du plan B,

Construction du plan A,

Construction du plan W,

Construction du plan E,

Construction du plan G,

Construction d'une droite intersection entre plan Z et le plan X,

Construction d'une droite intersection entre plan Z et le plan Y,

Construction du point d'origine,

Création du repère pièce (pour système de référence le point d'origine, plan Z, droite 1, et droite 2),

Construction du cylindre F,

Construction du cylindre C,

Construction du cylindre D,

Construction du cylindre 2,

Construction du cylindre 11,

Les fichiers de points sont convertis au format logiciel en utilisant une macro.

La figure 3.11, montre la conversion de fichier des points en nuages de point

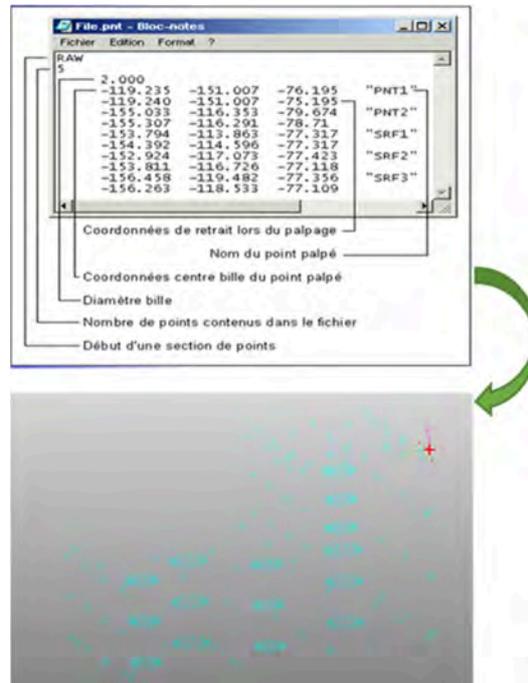


Figure 3.11 –Conversion de points en nuage de points

Dans le tableau 3.2, nous présentons les valeurs nominales des éléments géométriques et des spécifications géométriques, ces valeurs nominales seront comparées avec les valeurs mesurées par les logiciels.

Tableau 3.2 - Spécifications et Valeurs nominales

Spécification	Valeur nominale
Planéité (mm) du plan A	0
Cylindricité (mm) du cylindre F	0
Circularité (mm) du cercle C	0,1
Diamètre (mm)	10

3.10.5 Résultats et Discussion

Les résultats obtenus de ces mesures, sont présentés dans les figures ci-dessous, nous présentons ici les résultats de mesures de quelques éléments géométriques de deux logiciels de contrôlés 3D. Dans l'annexe II, nous présentons de résultats de mesures de plusieurs logiciels.

Avec l'application de l'approche de mesure, nous avons obtenu des résultats identiques avec les différents logiciels, dans l'évaluation des spécifications géométriques, et mesure d'éléments géométriques en utilisant le même le programme, mais les valeurs obtenus sont assez éloignées de valeurs nominales. Les dans figures les résultats obtenus de logiciels sont comparés avec les valeurs nominales.

La planéité du plan A (figure 3.14) a une valeur nominale zéro(0) et celle évaluée par les logiciels est de $0.118 \mu\text{m}$, la cylindricité du cylindre F (figure 3.16) de valeur nominale zéro(0), on obtient $0.1\mu\text{m}$, la circularité du cercle C (figure 3.17) de 10 millimètre, nous obtenons $0.163 \mu\text{m}$ au lieu de $0.1\mu\text{m}$ valeur nominale. Dans ces expériences seulement la mesure du diamètre du cylindre F (figure 3.15) les résultats obtenus par les logiciels sont identiques avec la valeur nominale. Nous avons appliqué notre étude sur le cas le plus pratiqué par les contrôleurs de 3D lors d'un contrôle d'une pièce sur MMT, donc les résultats présentés dans cet article sont les moyennes de trois mesures du programme, sur chacun des logiciels.

Les axes verticaux de graphes présentent les valeurs nominales, valeurs des éléments géométriques mesurés et les spécifications évaluées, les logiciels sont présentés sur les axes horizontaux.

La représentation de l'association des éléments géométriques par les deux types de logiciels est représentée dans les figures ci-dessous.

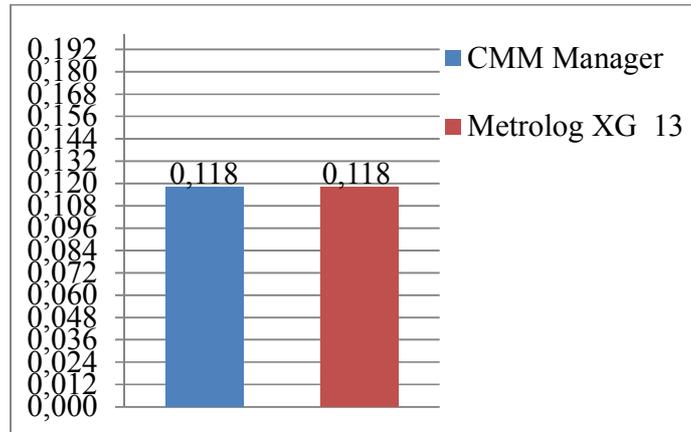


Figure 3. 14 - Planéité du plan A, obtenue de différents logiciels

Les résultats de mesure de diamètre du cylindre de 10 mm, des logiciels sont présentés dans la figure 3.15.

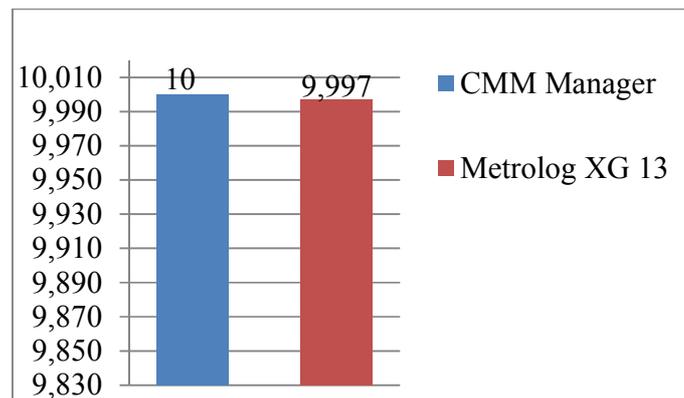


Figure 3. 15 -Résultats de mesures diamètre du cylindre de 10 mm

Dans la figure 3.16, nous présentons les valeurs de la cylindricité évaluées par les deux logiciels.

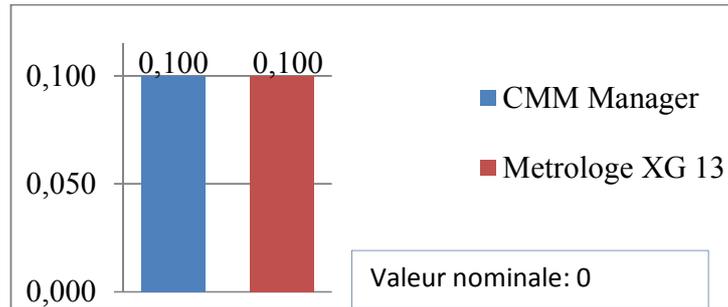


Figure 3. 16 -Cylindricité évaluée

Dans la figure 3.17, sont présentés les résultats de l'évaluation de la circularité du cercle

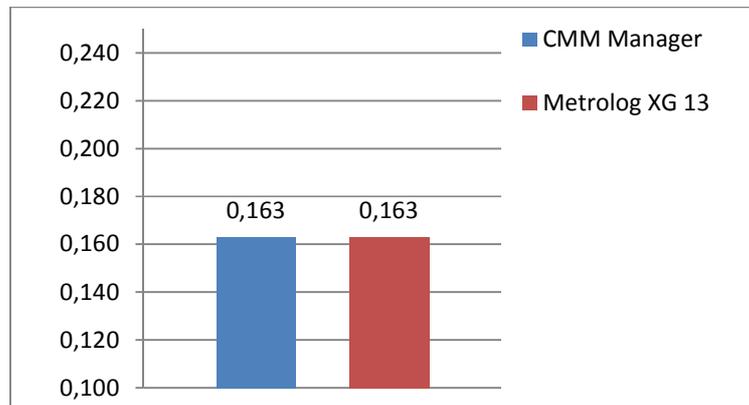


Figure 3. 17 -Circularité évaluée du cercle

Dans le tableau 3.3, nous présentons les écarts (entre les valeurs mesurées et les valeurs nominales) de toutes les spécifications géométriques évaluées, par le logiciel Metrolog XG 13.

Tableau 3. 3 -Ecart évalués par Metrolog XG 13

Spécifications	Valeurs nominales	Valeurs mesurées	Ecart
Circularité	0,1	0,163	0,063
Cylindricité	0	0,100	0,100
planéité	0	0,118	0,118
Diamètre	10	9,997	0,003

Dans le tableau 3.4, nous présentons les écarts (entre les valeurs mesurées et les valeurs nominales) de toutes les spécifications géométriques évaluées, par le logiciel CMM Manager.

Tableau 3. 4 -Ecart évalués par CMM Manager

Spécifications	Valeurs nominales	Valeurs mesurées	Ecart
Circularité	0,1	0,1630	0,063
Cylindricité	0	0,100	0,100
planéité	0	0,118	0,118
Diamètre	10	10	0,000

Le tableau 3.5, montre une comparaison des écarts obtenus par les deux logiciels, on constate que les résultats sont identiques sauf sur le diamètre, mais la différence n'est pas significative.

Tableau 3. 5 : Comparaison des écarts de deux logiciels

Spécifications	Valeurs nominales	Metrolog XG 13	CMM Manager
Circularité	0,1	0,063	0,063
Cylindricité	0	0,100	0,100
planéité	0	0,118	0,118
Diamètre	10	0,003	0,000

Après ces expériences, nous trouvons qu'il est judicieux de proposer un diagramme de 5M, permettant d'identifier les paramètres d'influences d'incertitudes de ces processus de mesures virtuelles. Nous constatons que les concepteurs des logiciels ne sont pas prêts pour l'instant de dévoiler les algorithmes de développement des logiciels dans la documentation, alors que la norme ISO/TS 15530-4 [5], dans ses exigences relatives aux logiciels d'évaluation des incertitudes, que le concepteur du logiciel doit explicitement déclarer tout facteur d'influence affectant l'incertitude de mesure couverte par le logiciel.

3.10.6 Proposition d'un diagramme 5M de mesures virtuelles

Le modèle de diagramme 5M, que nous proposons pour l'identification des paramètres d'influences d'incertitudes dans les résultats de processus de mesures virtuelles, nous nous focalisons principalement sur les différentes parties de traitement du logiciel.

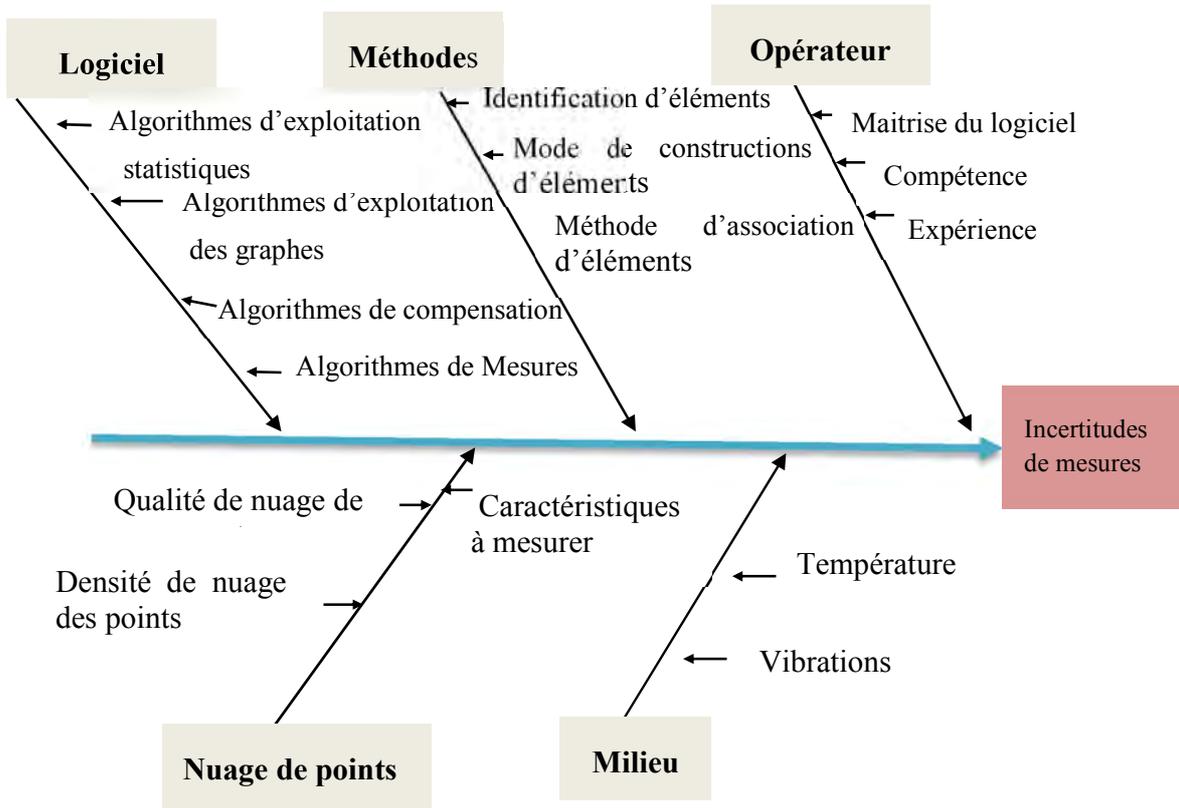


Figure 3. 18 - Diagramme de 5M proposé de processus de mesures virtuelles

3.10.7 Conclusion

Dans ce paragraphe, nous avons présenté la pièce à construire, avec les éléments géométriques. Pour l'étude expérimentale de la pièce à l'aide de nuage de points, il a été mis en place un programme de mesure. Nous avons obtenu des résultats identiques avec les deux logiciels utilisés, par contre les écarts sont assez éloignés par rapport aux valeurs nominales. Mais toute fois, il existe quelques écarts significatifs sur certaines caractéristiques géométriques. Ces écarts peuvent être expliqués, par les paramètres d'influences d'incertitudes du logiciel présentés dans le diagramme de 5M proposé. Nous avons comparé

ces résultats avec ceux d'autres laboratoires qui ont rejoint à notre hypothèse et effectué des mesures sur ces pièces dans le but de trouver les limites de logiciels de mesure 3D, et vérifier l'efficacité de leur méthodologie de mesure, les résultats d'inter comparaison seront mis dans l'annexe II de ce travail.

3.10.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué des études expérimentales de mesure virtuelles de deux types de pièces. Pour ce faire trois logiciels de mesure de 3D ont été utilisés dans ces expériences, il a été mis en place une méthodologie de mesures virtuelles, pour l'association des éléments géométriques et l'évaluation des spécifications, nous avons choisi la méthode de moindres carrés. Nous constatons que dans l'inter comparaison des résultats obtenus par les différents logiciels, il existe des écarts significatifs des valeurs sur certaines spécifications vérifiées, alors qu'un même programme est utilisé pour tous les logiciels. En métrologie, ces résultats confirment bien le facteur d'influence de la partie logicielle dans les résultats de mesure, comme d'autres études [29], [31], [37], ont montré les facteurs d'influences des incertitudes de la machine à mesurer tridimensionnelle.

Pour les laboratoires de métrologie et les ateliers, la partie logicielle est difficile à maîtriser, ce pourquoi les facteurs d'influences dus au logiciel sont ignorés dans la liste de paramètres d'influences des incertitudes de mesure. Afin d'identifier les principales sources d'incertitudes de mesures virtuelles, nous avons proposé l'identification des paramètres d'influences d'incertitudes de processus de mesures virtuelles dans un diagramme de 5M. Après nos expériences et de ces résultats, on est amené à poser les questions suivantes : Combien des pièces contrôlées sont déclarées non conformes à cause de la partie logicielle ? Les logiciels de contrôle 3D respectent bien les exigences fixées par les normes ISO GPS concernées par la partie logicielle ?

Il est nécessaire de réaliser des mesures virtuelles pour les influences du logiciel associé à la machine à mesurer tridimensionnelle, afin de comprendre et prendre des décisions sur les résultats de mesure, et respecter les directives normatives [1] qui exige que chaque mesure doit être accompagnée de son incertitude. La connaissance des facteurs d'influences est une phase indispensable pour l'estimation de l'incertitude de mesure.

Chapitre 4

Développement d'une méthodologie et d'un outil pragmatique d'estimation des incertitudes ou de la capacité MMT.

Sommaire

4.1	Introduction.....	80
4.2	Méthodologie générale.....	80
4.3	Analyse de système de mesure (MSA)	80
4.3.1	Différence entre MSA et incertitude	82
4.4	Conclusion.....	83
4.5	Etude expérimentale.....	83
4.5.1	Présentation du type de pièces expérimentales	83
4.5.2	Mode opératoire de mesures.....	85
4.6	Mise en œuvre « MSA et test R et R ».....	87
4.6.1	Introduction	87
4.6.2	Paramètres d'estimation des incertitudes de mesures ou de la capacité MMT.....	87
4.7	Estimation des incertitudes de mesure ou de la capacité MMT.....	89
4.8	Résultats et Discussion.....	89
4.9	Conclusion.....	100

4.1 Introduction

Ce chapitre fera l'objet de développement de la méthodologie d'estimation des incertitudes de mesure ou de la capabilité MMT, un outil destiné au contrôleur 3D de terrain !

4.2 Méthodologie générale

La méthodologie consiste à mettre en place, un système de mesures et un outil permettant au contrôleur d'estimer les incertitudes de mesure ou la capabilité MMT. En chapitre 2 nous avons montré par des expériences de mesures physiques d'une pièce étalon sur quatre MMTs, que les résultats obtenus varient d'une MMT à l'autre. Et en chapitre 3 nous avons réalisé de mesures virtuelles d'une pièce avec trois logiciels associés aux MMTs, les résultats obtenus sont presque identiques mais sont assez éloignés des valeurs nominales. Dans ce chapitre nous allons mettre en place un outil pragmatique pour le contrôleur 3D, par l'analyse de système de mesure et le test de répétabilité et reproductibilité de mesures, à partir des résultats de mesures physiques des pièces sur les MMTs.

4.3 Analyse de système de mesure (MSA) [53]

L'analyse de système de mesure est un concept qui permet de comprendre les sources de variation affectant la qualité de mesures, d'identifier et situer les différentes sources de variations, et définir le niveau de risque dans l'environnement du système mesure. Le MSA a pour objectif de présenter les lignes directrices pour la qualité du système de mesure dans son ensemble, en particulier dans le domaine industriel, mais elles peuvent être utilisées dans tout système de mesure. Le MSA porte aussi sur les aspects de la mesure, nous présentons quelques-uns de manière brève, les normes utilisées pour les définitions des spécifications géométriques ayant permis pour l'obtention des résultats de mesure, doivent avoir les mêmes significations durant le cycle de vie du système de mesure.

La répétabilité de mesure

Dans cet aspect de condition des mesures définies, on détermine :

Les variations des mesures successives à court terme, les variations de l'équipement,...

La reproductibilité

Cet aspect définit, la validation de la procédure de mesure, les variations dues à l'opérateur et les variations de conditions de mesures,...

Un système de mesure doit être capable et performant, et sensible pour qu'on puisse obtenir des résultats de mesure, statistiquement cohérents dans le temps, et uniforme aux changements de répétabilités sur la plage de fonctionnement normal, et proches des valeurs vraies.

La sensibilité

Le système de mesure sensible, la plus petite entrée est détectable en sortie, et il est réactif aux changements de caractéristiques mesurées.

Variation du système de mesure

La variation du système de mesure peut être caractérisée par :

La variation des mesures effectuées sur une courte période, on définit la capacité du système.

La variation des mesures effectuées sur une longue période basée sur la variation totale, on définit la performance du système.

Et l'intervalle des mesures parmi lesquelles la vraie valeur supposée contenir, on estime l'incertitude de mesure du système.

Pour bien maîtriser le système de mesure, il faut nécessairement bien connaître le processus de mesure dans les faits suivants :

Ce que devrait faire le processus, ce que le processus ne peut pas le faire et ce que fait le processus. Le principe de processus de mesure est présenté dans la figure 4.1

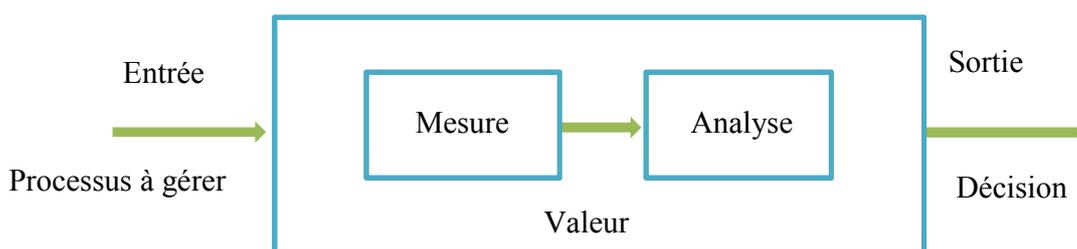


Figure 4. 1 - Processus de Mesure

Dans un processus de mesure, les spécifications et les exigences techniques sont appliquées dans la partie mesure, définissant la fonction du processus, et l'analyse permet de prendre la décision sur ce qu'a fait le processus par rapport de ce que devrait faire ce processus de mesure.

Pour pérenniser le processus de mesure, on doit adopter une stratégie de planification de mesures. Cette planification est importante dans le fonctionnement du processus de mesure à long terme, permet la réduction des causes possibles et la prévention des erreurs de mesure. Elle consiste de maintenir une méthode d'évaluation des spécifications, une gestion efficace et traçable de données sorties du système de mesure durant son cycle de vie, et aussi maintenir l'amélioration du système de mesure avec l'évolution technologique et technique de moyens de mesure.

Pour prendre la décision sur la sortie du processus de mesure, en général le contrôleur doit calculer la variation du système de mesure, qui est égale à la somme des sigmas (sigma de la répétabilité, et de reproductibilité) au carré, définie par l'équation suivante :

$$\sigma^2_{R\&R(\text{système de mesure})} = \sigma^2_{\text{répétabilité}} + \sigma^2_{\text{reproductibilité}}$$

Pour connaître la capacité du système de mesure, on estime la capacité du système de mesure en fonction de la variation du biais du système et de la variation système définie ci-dessus. Le biais est la différence entre la valeur de référence et la valeur moyenne observée des mesures sur la même caractéristique sur une pièce, il définit l'erreur systématique du système de mesure.

La capacité du système mesure est définie somme suit :

$$\sigma^2_{\text{capabilité}} = \sigma^2_{\text{biais}} + \sigma^2_{R\&R}$$

Le système de mesure, doit être aussi performant dans le temps, ainsi la performance tient compte de tous les effets significatifs et de toutes les sources de variations identifiables au cours du temps. La capacité à court terme, la stabilité et la cohérence. Cette performance est définie par la relation suivante : $\sigma^2_{\text{performance}} = \sigma^2_{\text{capabilité}} + \sigma^2_{\text{stabilité}} + \sigma^2_{\text{cohérence}}$

Analyser le système de mesure, c'est prendre une décision en fonction de résultats de paramètres influents du système de mesure. Pour les lignes directrices du MSA cette décision se base sur les critères du pourcentage du R&R, pour l'acceptabilité du système de mesure.

Si % R&R est inférieur à 10 % le système de mesure est bon,

Si %R&R est compris entre 10 % et 30% le système de mesure peut être acceptable, mais le système peut être amélioré.

Si %R&R est supérieur à 30 % le système de mesure n'est pas acceptable,

4.3.1 Différence entre MSA et incertitude

L'incertitude est un intervalle définie des valeurs de résultats de mesure, dans lequel la valeur réelle de la mesure devrait se trouver. Alors que le MSA se base sur le processus de mesure pour la détermination de l'erreur dans le processus et évaluer la concordance de la mesure pour le contrôle des produits, le MSA met l'accent sur la compréhension et amélioration du processus de mesure.

4.4 Conclusion

Dans cette partie nous avons présenté les objectifs de ce chapitre, et le principe du MSA. Nous avons défini aussi le processus de mesure, une étude des différents paramètres pour l'analyse du système de mesure a été effectuée, la différence entre incertitude et MSA est définie aussi. Dans le travail qui suit nous allons réaliser une étude expérimentale permettant de mettre en place le MSA et le test de répétabilité et de reproductibilité.

4.5 Etude expérimentale

Cette étude a pour but de mettre en place un outil d'estimation des incertitudes ou la capacité de la MMT. Pour ce faire nous expérimentons par des mesures physiques sur des MMTs, nous utilisons dix (10) pièces identiques numérotées pour ne pas répéter les mesures sur les mêmes pièces. Nous effectuons trois séries de mesure, dans chaque de série de mesure chaque pièce est mesurée trois fois.

4.5.1 Présentation du type de pièces expérimentales

Dans les figures ci-dessous, nous présentons les différentes parties de la CAO, présentant la conception du type des pièces en 3D et les spécifications à vérifier.

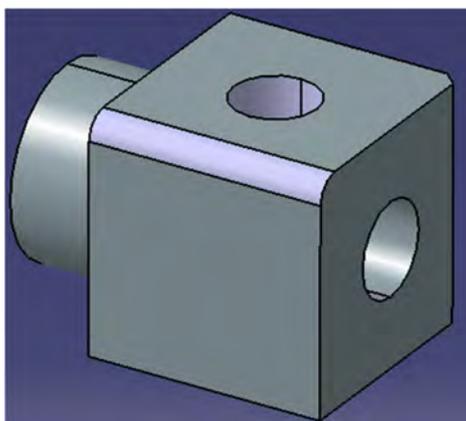


Figure 4. 3 - CAO 3D de la pièce

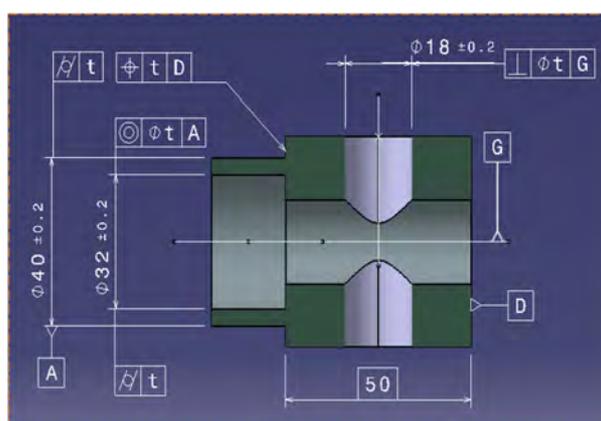


Figure 4. 2 - Vue de coupe

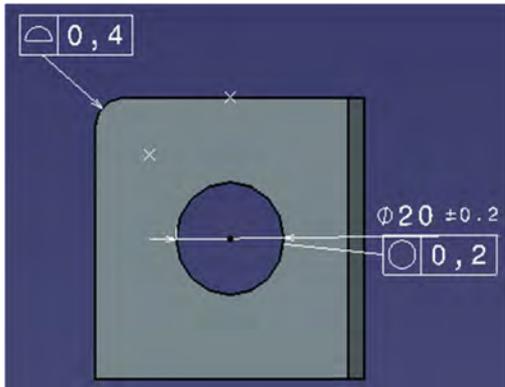


Figure 4.5 - Vue de derrière

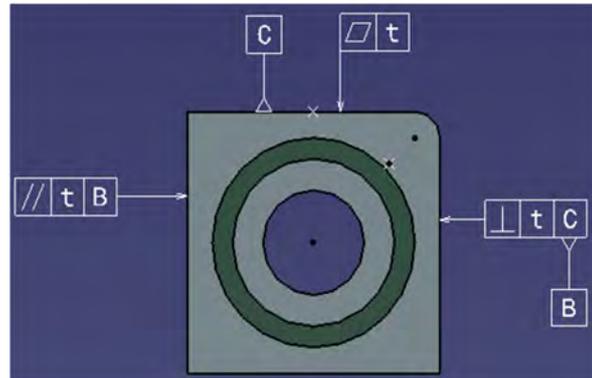


Figure 4.4 - Vue de face

La conception de la CAO 3D de la pièce a été réalisée avec le logiciel CATIA.

CATIA, acronyme de Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée, est un logiciel principalement utilisé dans l'industrie et la conception qui permet d'effectuer de la cotation 3D [51] de la CAO 3D, mis au point par la société Dassault Aviation. Il regroupe un nombre important de modules intégrés dans un seul et même environnement de travail. Ses modules permettent de modéliser une géométrie (CAO), de réaliser des analyses et des simulations, de mener une étude d'industrialisation (conception des outillages), de générer les plans de fabrication des pièces etc.

Les dix pièces expérimentales fabriquées sont représentées dans la figure 4.6.



Figure 4.6 - Pièces expérimentales

4.5.2 Mode opératoire de mesures

Pour réaliser des mesures de pièces sur les différentes machines, nous avons mis en place un mode opératoire, afin d'harmoniser le système de mesure sur toutes les MMTs du laboratoire, et d'analyser les résultats de mesures avec la même méthode.

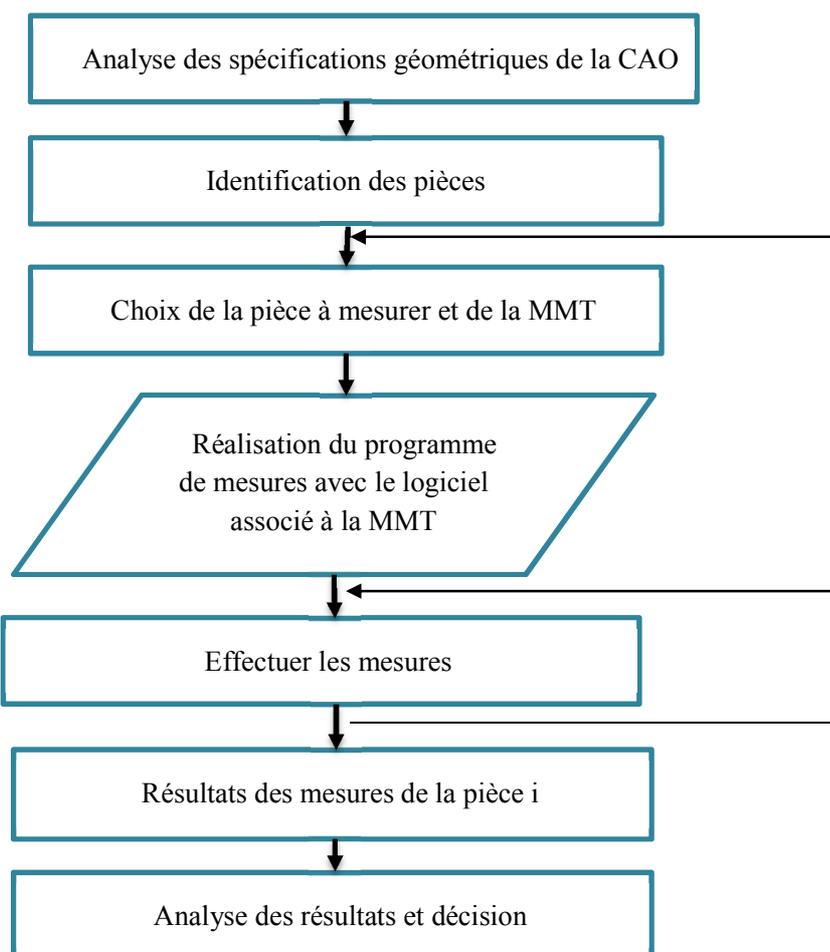


Figure 4. 7 - Mode opératoire des mesures

La figure 4.8 présente la préparation de mesures pour s'assurer de l'accessibilité du palpeur à toutes les parties à contrôler de la pièce. Un dégauchissage est effectué manuellement avant les mesures en automatique du programme par la machine. Entre toutes les deux mesures, la pièce est enlevée puis remise au même endroit.



Figure 4. 8 - Dégauchissage de la pièce

L'analyse des spécifications géométriques, cette étape qui permet au contrôleur de prendre connaissance de toutes les spécifications et les éléments de la pièce à vérifier. La numérotation de pièces permet d'éviter au contrôleur de remesurer les mêmes pièces plus de fois dans une série et facilite aussi l'exploitation des résultats de mesure. Le choix de la pièce par laquelle commencer avec les mesures ne donne pas de priorité aux pièces à mesurer, mais donne la connaissance sur les pièces mesurées, ainsi que pour la MMT si l'opérateur a sa dispositions plusieurs MMTs.

Le programme des mesures, dans cette partie on définit comment et avec quelles méthodes sont effectuées les mesures, selon les possibilités que dispose le logiciel associé à la MMT choisie.

Effectuer les mesures, dans cette partie le contrôleur exécute le programme réalisé de mesures, mais elle est souvent mise avec la partie programmation de mesures.

Résultats de mesures, cette partie contient les valeurs des éléments géométriques mesurées et de spécifications évaluées.

La figure 4.9, présente l'exécution du programme de mesures réalisé dans le logiciel Metrolog de la MMT Zeiss.

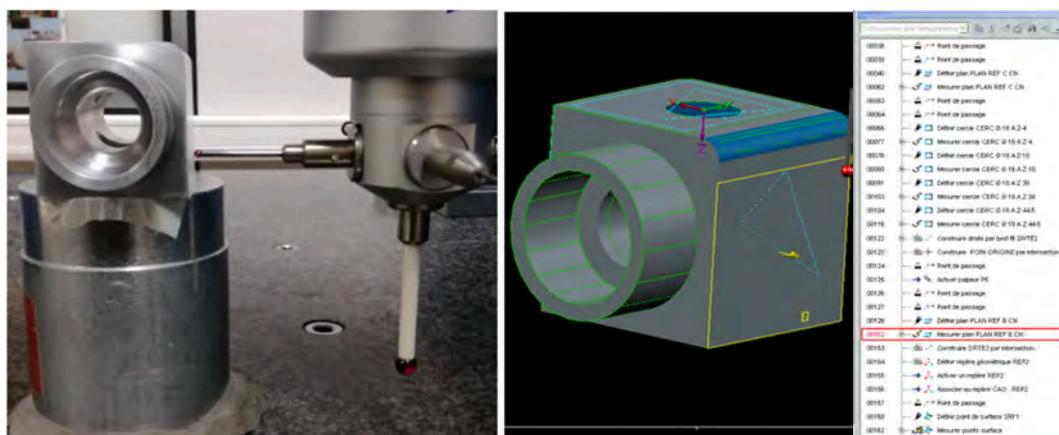


Figure 4.9 - Exécution de gamme de mesures

Dans la partie de l'analyse des résultats et décision, après chaque série de mesures des pièces, nous déterminons la capacité de la MMT pour la spécification vérifiées ou pour l'ensemble des mesures effectuées. Pour cela nous allons mettre en œuvre « MSA et test R et R ».

4.6 Mise en œuvre « MSA et test R et R »

4.6.1 Introduction

L'objectif de la mise en œuvre de cet outil dans cette partie des travaux de thèse est d'exploiter les résultats de mesure, déterminer l'acceptabilité du système de mesure, par la détermination de la capacité MMT, ou l'estimation de l'incertitude de mesure.

Le cycle de vie d'une pièce comprend trois phases, la conception, la fabrication et le contrôle, donc après la fabrication il est impératif de contrôler la pièce pour la conformité avec les exigences normatives et techniques du cahier des charges de la CAO du concepteur, de ce fait il faut s'assurer aussi de la capacité du système de mesure.

4.6.2 Paramètres d'estimation des incertitudes de mesures ou de la capacité MMT

Dans la méthode MSA et test R&R, plusieurs paramètres de dispersion sont utilisés nous définissons ces paramètres d'estimation de la dispersion de mesures par des équations qui lient les uns aux autres dans un premier temps et ensuite nous allons les implanter dans une feuille de calcul format Excel pour la partie pratiques de ces travaux.

Ces paramètres d'estimation de dispersion de mesure sont définis comme suit :

La dispersion de la répétabilité du moyen de mesures EV est définie par :

$EV = \bar{X}/K_2$, \bar{X} est l'étendue moyenne ; K_2 coefficient dépendant nombre de mesures.

La reproductibilité des mesures AV (ou σ_{AV}) est définie par :

$AV = \sqrt{\left(\frac{\bar{X}}{K_2}\right)^2 - \left(\frac{EV}{nr}\right)^2}$, \bar{X} est la moyenne des étendues de moyennes, n est le nombre des pièces mesurées, et r est le nombre des mesures réalisées par série.

On définit la répétabilité et reproductibilité de mesures R&R (ou $\sigma_{R\&R}$), par :

$$R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2} .$$

La dispersion des pièces V_P (ou σ_p) est définie par :

$Vp = Rp * K_3$, où, R_p est l'étendue des moyennes des pièces, et K_3 est le coefficient dépendant du nombre des pièces.

On définit la dispersion totale du système de mesure TV (ou σ_t), par :

$$TV = \sqrt{R\&R^2 + Vp^2}$$

La variation du système peut être définie aussi par deux autres méthodes :

Pour la prise de décision sur la capacité du système de mesure, on déduit le pourcentage (%) de ces paramètres.

% R&R représente la variation totale de système de mesure,

$$\% R\&R = 100 * [R\&R / TV]$$

% répétabilité = $100 * \left[\frac{EV}{TV} \right]$, représente le pourcentage de la répétabilité due à la machine

% reproductibilité = $100 * \left[\frac{AV}{TV} \right]$, représente le pourcentage de la reproductibilité due à l'opérateur. Dans notre expérience, nous considérons que l'influence de l'opérateur n'est pas significative, puisque les résultats pris en compte de mesures, sont ceux obtenus par les mesures automatiques de la machine.

La valeur de la capacité estimée, est définie par le nombre de classification de données qui est de 1,41 pour un niveau de confiance à 97 %, de la variation des pièces et de la variation de la répétabilité MMT.

Capabilité MMT = $1.41 * \left[\frac{Vp}{GR} \right]$, si on obtient une capacité supérieure ou égale à 4, le système est capable pour l'évaluation de la spécification vérifiée, et si la valeur est inférieure à 4 alors la MMT n'est pas capable pour l'évaluation cette spécification à cette mesure, donc il faut refaire les mesures tout en vérifiant les étapes de la figure 4.7.

4.7 Estimation des incertitudes de mesure ou de la capacité MMT

Pour estimer la capacité MMT, à partir des résultats de mesures effectuées sur les pièces, nous utilisons l'outil d'estimation de la capacité MMT, dans une feuille d'Excel où toutes les formules permettant d'estimer les incertitudes ou la capacité MMT sont implantées. Cet outil permet d'insérer les résultats de mesures obtenus par les logiciels associés aux MMTs, effectuées des différentes séries de mesures de pièces. Les valeurs des paramètres sont calculées automatiquement, permettant ainsi de prendre la décision sur la capacité MMT.

Nous effectuons des mesures de trois séries de trois mesures sur chacune de dix pièces, le tableau 4.1 présente l'exemple une série de mesures.

Tableau 4. 1 - Présentation d'une série des mesures

Pièces	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne de mesures
Mesure1											
Mesure2											
Mesure3											
Moyenne											
Etendue											
Moyenne des moyennes											
Moyenne des étendues											

Dans une série on effectue plusieurs opérations de calcul, la moyenne de moyennes est calculée à partir des moyennes de toutes les pièces, ainsi la moyenne des étendues, comme nous avons indiqué par les flèches dans le tableau 4.1. Et la moyenne de mesures dans cette colonne on calcule les moyennes de toutes les mesures effectuées dans cette série.

Nous réalisons trois séries de mesures, les résultats de trois séries de mesure nous permettent de déterminer les paramètres du système de mesure définis ci-dessus.

4.8 Résultats et Discussion

Dans les paragraphes, nous présentons les résultats de mesures effectuées avec deux machines à mesurer tridimensionnelles à commande numérique. Les résultats de spécifications sont présentés dans les tableaux (4.2, à 4.11).

Dans la figure 4.10, nous présentons les résultats de mesures de dix pièces de trois séries (S1, S2, S3) de mesure dans laquelle chaque pièce est contrôlée trois fois.

Dans la figure 4.10, sont calculées les paramètres permettant d'estimations des incertitudes ou de la capacité MMT.

- La moyenne de trois mesures de chacune des pièces,
- Etendue de mesures de toutes les pièces,
- Moyennes (Xs1, Xs2, Xs3) de chaque mesure de toutes les séries,
- Moyennes de moyennes de toutes les pièces de séries de mesure,
- Moyennes des étendues (Rs1, Rs2, Rs3) de chaque série de mesure,
- Moyenne de pièces de toutes les séries de mesures,
- Moyenne (\bar{X}) de moyennes de toutes les pièces de toutes les séries de mesures,
- Moyenne (\bar{R}) des moyennes des étendues de toutes les séries,
- Etendue (Rp) de moyennes de toutes les pièces de toutes les séries,
- Max de moyennes de moyennes de toutes les séries de mesures,
- Min de moyennes de moyennes de toutes les séries de mesures,
- La différence (ΔX) entre le max et min.

Le tableau 4.9, présente les résultats de l'évaluation de la cylindricité (en mm) du cylindre de diamètre 32 mm, de 10 pièces de la MMT Zeiss et les paramètres permettant d'estimer les incertitudes ou la capacité MMT. Les résultats des autres spécifications sont présentés dans l'annexe III

Saisie des résultats pour l'estimation des incertitudes ou de la capacité MMT												
Séries	Mesures	N° de pièces										Moyenne
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
S1	1	0,025	0,037	0,023	0,028	0,030	0,028	0,033	0,036	0,030	0,025	0,030
	2	0,021	0,036	0,025	0,030	0,031	0,026	0,039	0,036	0,029	0,026	0,030
	3	0,021	0,036	0,025	0,029	0,031	0,026	0,034	0,035	0,030	0,026	0,029
	Moyenne	0,022	0,036	0,024	0,029	0,031	0,027	0,035	0,036	0,030	0,026	Xs1 = 0,030
S2	1	0,022	0,036	0,025	0,030	0,031	0,026	0,033	0,036	0,029	0,026	0,030
	2	0,021	0,037	0,025	0,029	0,031	0,026	0,033	0,034	0,029	0,026	0,029
	3	0,022	0,041	0,025	0,028	0,029	0,025	0,037	0,036	0,030	0,025	0,030
	Moyenne	0,022	0,038	0,025	0,029	0,030	0,026	0,034	0,035	0,031	0,026	Xs2 = 0,030
S3	1	0,021	0,037	0,026	0,033	0,031	0,025	0,031	0,036	0,030	0,026	0,030
	2	0,021	0,037	0,026	0,030	0,032	0,025	0,032	0,035	0,030	0,025	0,029
	3	0,021	0,036	0,026	0,029	0,031	0,026	0,030	0,035	0,030	0,026	0,029
	Moyenne	0,021	0,037	0,026	0,031	0,031	0,025	0,031	0,035	0,030	0,026	Xs3 = 0,029
Etendue		0,000	0,001	0,000	0,004	0,001	0,001	0,002	0,001	0,000	0,001	Rs3 = 0,001
Moyennes de pièces		0,022	0,037	0,025	0,030	0,031	0,026	0,034	0,035	0,031	0,026	X̄ = 0,030
Max X = 0,03		Min X = 0,03		ΔX = 0,00		Rp = 0,015				R̄ = 0,0020		

Figure 4.10 - Modèle de saisie de résultats pour l'estimation des incertitudes ou de la capacité MMT

La formule suivante, permet l'estimation des incertitudes-types u_p , des résultats de mesures définie [4] par les équations ci-dessous.

$$U_{ps} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad \text{D'où} \quad \bar{X} = 1/n \sum_{i=1}^n X_i,$$

(n est le nombre de mesures de la série, et \bar{x} est la moyenne de mesures de la série).

On estime incertitude-élargie u_p des résultats de mesures de trois séries de mesures d'une pièce comme suit, avec le facteur d'élargissement $K=2$.

$$u_{ppieces} = 2 * \sqrt{U_{ps1}^2 + U_{ps2}^2 + U_{ps3}^2}$$

La figure 4.11, présente les incertitudes –types et élargies estimées, des résultats d'évaluation du parallélisme, de la catégorie 3S_3M_10P. Nous présentons les résultats des autres spécifications dans l'annexe II.

Estimation des incertitudes-types et élargies										
Pièces										
Séries	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S1	4,62E-03	1,00E-03	1,15E-03	5,77E-04	2,00E-03	5,77E-04	1,73E-03	2,65E-03	4,73E-03	1,00E-03
S2	1,2E-03	1,0E-03	1,0E-03	1,5E-03	1,0E-03	0,0E+00	2,1E-03	2,5E-03	1,0E-03	3,5E-03
S3	2,14E-03	4,72E-04	9,42E-04	2,36E-04	4,66E-04	1,41E-03	1,18E-03	2,59E-03	3,07E-03	0,00E+00
U_p pièces	1,04E-02	2,98E-03	3,59E-03	3,30E-03	4,57E-03	3,04E-03	5,91E-03	8,95E-03	1,15E-02	7,21E-03

Figure 4. 11 - Estimation des incertitudes-types et élargies de l'évaluation du parallélisme

Pour optimiser le temps de mesures pour l'estimation de la capacité MMT CN, nous avons fait une étude de cinq(5) catégories de mesure permettant d'estimer la capacité MMT

- 1) Catégorie 3 séries, 3 mesures, 10 pièces, (3S_3M_10P),
- 2) Catégorie 3 séries, 3 mesures, 5 pièces, (3S_3M_5P),
- 3) Catégorie 2 séries, 3 mesures, 5 pièces, (2S_3M_5P),
- 4) Catégorie 2 séries, 2 mesures, 5 pièces, (2S_2M_5P),
- 5) Catégorie 2 séries, 2 mesures, 3 pièces, (2S_2M_3P).

Les paramètres calculés dans la figure 4.10, permettent d'estimer la capacité MMT CN, la figure 4.11, présente le modèle du rapport d'estimation de la capacité MMT.CN estimée.

Rapport d'estimation de la Capabilité MMT					
Nom pièce:	test	Nom machine:		Date:	28/5/17
Type de pièces:	ALLU	ID machine:		No rapport:	42883/test/6
Spécification évaluée:	Cylindricité			Réalisé par:	Charfadine
Nbre opérateurs	3	Nbre de pièces(n):	10	nombre des mesures(r):	3
K1 =	0,5908	K2 =	0,5231	K3 =	0,3146
R ⁻ =	0,0020	ΔX =	0,0005	Rp=	0,015
Calcul de paramètres				Variation en % (TV)	
Variation de la Répétabilité (EV) MMT				% EV = 100 [EV/TV] = 100 [0,00118/0,00497] = 23,79 %	
EV = R ⁻ x K1 = 0,002 x 0,5908 = 0,00118		mesures	K1		
		2	0,8862		
		3	0,5908		
Variation de la Répétabilité				% GR = 100 [GR/TV] = 100 [0,00118/0,00497] = 23,79 %	
GR = (EV ²) ^{0,5} = (0,00118 ²) ^{0,5} = 0,00118		Série	K2		
		2	0,7071		
		3	0,5231		
Variation de la Répétabilité				% PV = 100 [PV/TV] = 100 [0,00482/0,00497] = 97,13 %	
PV = Rp x K3 = 0,015 x 0,3146 = 0,00482		Pièces	K3		
		2	0,7071		
		3	0,5231		
		4	0,4467		
		5	0,403		
		6	0,3742		
Variation Totale (TV)				ndc = 1,41 (PV/GR) = 1,41 (0,00482/0,00118) = 5,756 = 6	
TV = (GR ² + PV ²) ^{0,5} = (0,00118 ² + 0,00482 ²) ^{0,5} = 0,00497		7	0,3534		
		8	0,3375		
		9	0,3249		
		10	0,3146		
Commentaire du Contrôleur:			Decision		

Figure 4. 12 - Modèle de Rapport d'estimation de la Capabilité MMT

Les valeurs de coefficients K1, K2, et K3 varient en fonction du nombre de séries, de mesures et de pièces. [MSA]

Les capacités de la MMT Zeiss estimées de différentes spécifications, obtenues de cinq(5) catégories sont présentées dans les tableaux suivants :

Dans le tableau 4.2, on présente la capacité MMT CN de la catégorie de trois séries, trois mesures et dix pièces.

Tableau 4. 2 - Capabilité de la catégorie 3S_3M_10P

Catégorie : 3S_3M_10P	
Spécifications	Capabilité
Coaxialité	8
Perpendicularité du plan	9
planéité	3
Diamètre ø40	11
cote de 50	35
Circularité	1
Cylindricité Cyl ø40	3
Diamètre ø32	29
parallélisme	7
perpendicularité l'axe	6
Localisation du plan D	6
Cylindricité Cyl ø32	6
Forme d'une ligne	3

Le tableau 4.3, présente la capabilité estimée de la catégorie de trois séries, trois mesures et cinq pièces.

Tableau 4. 3 - Capabilité de la catégorie 3S_3M_5P

Catégorie : 3S_3M_5P	
Spécifications	Capabilité
Coaxialité	5
Perpendicularité du plan	10
planéité	3
Diamètre ø40	18
Cote de 50	43
Circularité	2
Cylindricité Cyl_ø40	3
Diamètre ø32	40
parallélisme	8
perpendicularité l'axe	8
Localisation du plan D	6
Cylindricité Cyl_ø32	9
Forme d'une ligne	2

Dans le tableau 4.4, on trouve la capabilité estimée de la catégorie de deux séries, trois mesures et cinq pièces.

Tableau 4. 4 - Capabilité de la catégorie 2S_3M_5P

Catégorie : 2S_3M_5P	
Spécifications	Capabilité
Coaxialité	4
Perpendicularité du plan	13
planéité	3
Diamètre $\varnothing 40$	21
Cote de 50	62
Circularité	2
Cylindricité Cyl_ $\varnothing 40$	3
Diamètre $\varnothing 32$	67
parallélisme	8
perpendicularité l'axe	8
Localisation du plan D	7
Cylindricité Cyl_ $\varnothing 32$	7
Forme d'une ligne	2

La capabilité de la catégorie de deux séries, deux mesures et cinq pièces, est présentée dans le tableau 4.5

Tableau 4. 5 - Capabilité de la catégorie 2S_3M_5P

Catégorie : 2S_2M_5P	
Spécifications	Capabilité
Coaxialité	6
Perpendicularité du plan	10
planéité	3
Diamètre $\varnothing 40$	21
Cote de 50	55
Circularité	5
Cylindricité_Cyl_ $\varnothing 40$	4
Diamètre $\varnothing 32$	52
parallélisme	7
perpendicularité l'axe	6
Localisation du plan D	7
Cylindricité Cyl_ $\varnothing 32$	6
Forme d'une ligne	1

Dans le tableau 4.6, nous présentons la capabilité MMT estimée de deux séries, deux mesures et trois pièces.

Tableau 4. 6 - Capabilité de la catégorie 2S_2M_3P

Catégorie : 2S_2M_3P	
Spécifications	Capabilité
Coaxialité	6
Perpendicularité du plan	3
planéité	1
Diamètre $\varnothing 40$	25
Cote de 50	53
Circularité	16
Cylindricité Cyl_ $\varnothing 40$	3
Diamètre $\varnothing 32$	81
parallélisme	8
perpendicularité l'axe	7
Localisation du plan D	10
Cylindricité Cyl_ $\varnothing 32$	8
Forme d'une ligne	1

Nous avons présenté dans les tableaux précédents les capabilités estimées de toutes les catégories, comme le but de traiter les résultats par catégorie est de pouvoir trouver la plus commode pour l'estimation de la capabilité MMT avec plus d'économie du temps et dans laquelle la MMT est capable d'évaluer plus de spécifications géométriques. Pour ce faire il faut présenter les résultats de ces tableaux sous forme des graphes.

Dans la figure 4.11, sont présentés les graphes de capabilités MMT de spécifications par catégorie, que nous avons présentées précédemment dans les tableaux 4.2 à 4.6.

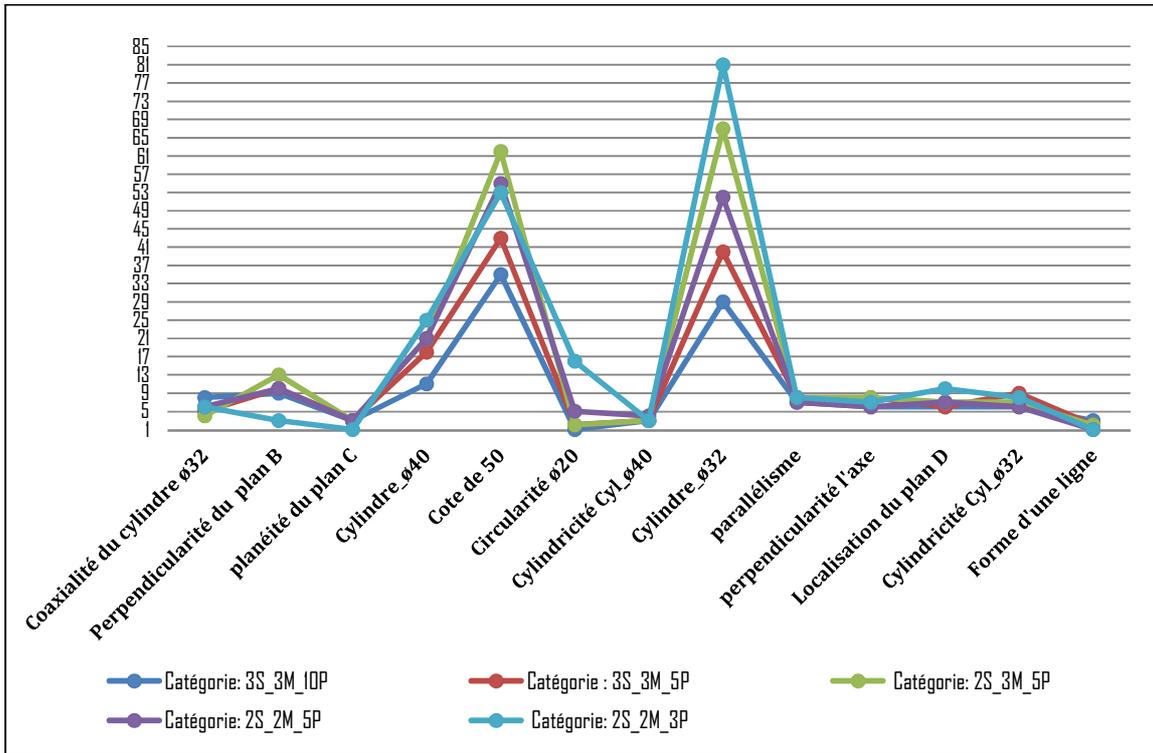


Figure 4.13 - Graphes de capacités estimées de spécifications par catégorie, MMT Zeiss

Afin d'analyser et interpréter les résultats, nous avons tracé des graphes de capacités de spécifications de toutes les catégories dans la figure 4.11. En comparant les graphes on peut constater pour quelle spécification et dans quelle catégorie la MMT est capable ou pas et aussi la catégorie mieux adaptée à toutes les spécifications pour un temps économique. Nous trouvons les valeurs de la capacité les importantes dans toutes les catégories sur les éléments géométriques où les mesures nécessitant peu de variations sur l'axe Z de la MMT. La catégorie 2S_2M_3P, permet un gain du temps considérable par rapport aux autres, avec des capacités MMT de spécifications sont souvent supérieures à quatre (4) puisque le temps de contrôle d'une pièce est de 15 minutes par mesure. D'une manière générale, on trouve des valeurs de la capacité assez proches en termes d'uniformité sur chaque spécification avec les différentes catégories.

Pour vérifier les résultats de cet outil et son efficacité, nous avons effectués d'autres mesures sur une autre MMT (Nikon) de dernière génération, avec la même gamme de mesure.

Les capacités estimées des résultats de mesures effectuées sur la MMT Nikon sont présentés par catégorie dans les tableaux ci-dessous.

Le tableau 4.7 présente la capacité MMT des spécifications de la catégorie 3S_3M_10P

Tableau 4. 7 - Capacité de 3S_3M_10P

Catégorie : 3S_3M_10P	
Spécifications	Capabilité
Coaxialité	4
Perpendicularité du plan	69
planéité	182
Cylindre_ø40	33
Cote de 50	18
Cylindricité_Cyl_ø32	24
Cylindricité_Cyl_ø40	4
Cylindre_ø32	108
parallélisme	7

Nous présentons la capacité MMT de spécifications de résultats de cinq pièces, dans le tableau 4.8

Tableau 4. 8 - Capacité de 3S_3M_5P

Catégorie : 3S_3M_5P	
Spécifications	Capabilité
Coaxialité	8
Perpendicularité du plan	37
planéité	34
Cylindre_ø40	53
Cote de 50	18
Cylindricité_Cyl_ø32	33
Cylindricité_Cyl_ø40	6
Cylindre_ø32	82
parallélisme	6

Dans le tableau 4.9, on trouve les résultats de l'estimation de la capacité de la catégorie deux séries, trois mesures et cinq pièces.

Tableau 4. 9 - Capacité de la catégorie 2S_3M_5P

Catégorie : 2S_3M_5P	
Spécifications	Capabilité
Coaxialité	12
Perpendicularité du plan	31
Planéité	15
Cylindre_ø40	44
Cote de 50	17
Cylindricité_Cyl_ø32	35
Cylindricité_Cyl_ø40	5
Cylindre_ø32	62
Parallélisme	6

La capabilité estimée de 2S_2M_5P, est présentée dans le tableau 4.10

Tableau 4. 10 - Capabilité de 2S_2M_5P

Catégorie : 2S_2M_5P	
Spécifications	Capabilité
Coaxialité	9
Perpendicularité du plan	25
Planéité	17
Cylindre_ø40	52
Cote de 50	14
Cylindricité_Cyl_ø32	90
Cylindricité_Cyl_ø40	29
Cylindre_ø32	83
Parallélisme	5

Dans le tableau 4.11, on présente la capabilité de la catégorie dans laquelle on effectue le nombre minimum de mesure et de pièces pour l'estimation de la capabilité.

Tableau 4. 11 - Capabilité MMT de 2S_2M_3P

Catégorie : 2S_2M_3P	
Spécifications	Capabilité
Coaxialité	11
Perpendicularité du plan	86
Planéité	10
Cylindre_ø40	79
Cote de 50	14
Cylindricité_Cyl_ø40	45
Cylindricité_Cyl_ø32	75
Cylindre_ø32	181
Parallélisme	8

Les résultats des capabilités estimées de spécifications, de cette dernière MMT CN, sont présentés par les graphes de la figure 4.14. On constate une conformité des résultats de spécifications vérifiées précédemment avec la MMT Zeiss.

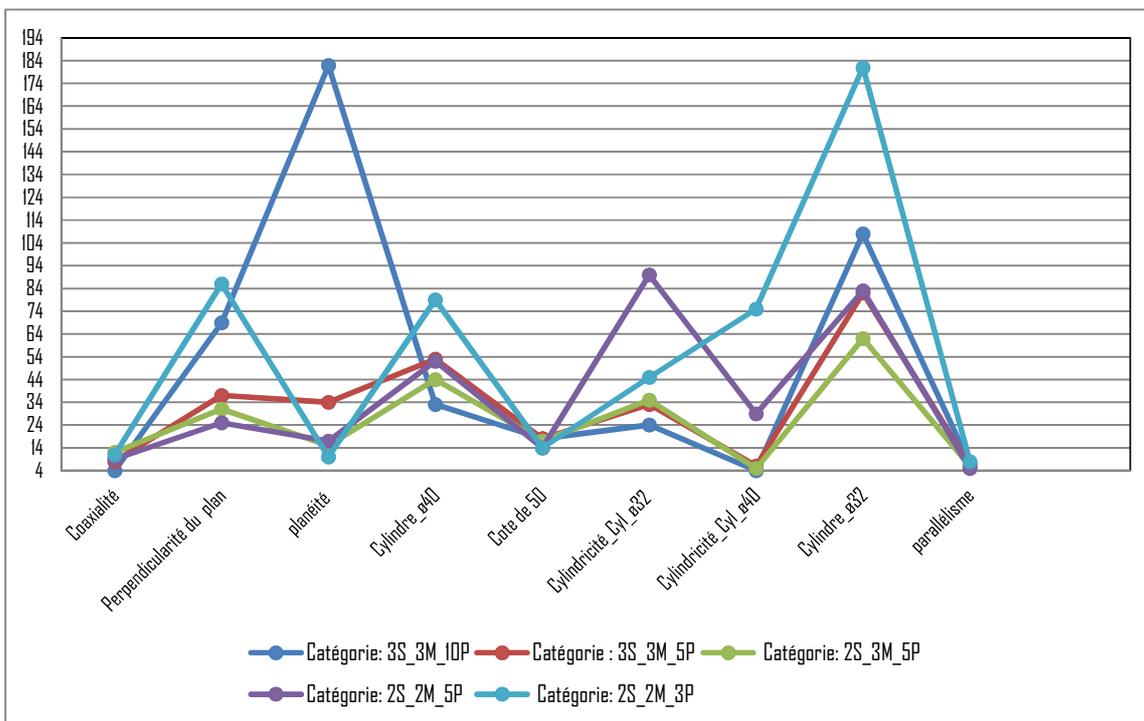


Figure 4. 14 - Graphes de capacités estimées de spécifications par catégorie, MMT Nikon

Nous constatons dans les résultats de la figure 4.14, que les valeurs de la capacité sont supérieures ou égales à 4 dans toutes les catégories, ce qui nous permet d'affirmer que cette MMT CN est capable pour l'évaluation de ces spécifications, contrairement à la MMT Zeiss .

Comme dans les résultats de la capacité MMT Zeiss, trouvons que la catégorie 2S_2M_3P est la mieux adaptée puisqu'on utilise moins de pièces et avec peu du temps d'occupation machine.

4.9 Conclusion

Dans cette partie de l'étude expérimentale, nous avons présenté d'abord le logiciel CATIA avec lequel la conception de la CAO pièces est réalisée, ainsi que la CAO et les dix (10) pièces fabriquées soumises à l'expérimentation. Un mode opératoire de mesure comprenant les différentes étapes a été illustré par un organigramme. Nous avons défini aussi la méthode de calcul des paramètres permettant l'estimation des incertitudes de résultats de mesures ou de la capacité MMT. Il a été présenté aussi le modèle de l'outil de saisie des résultats pour l'estimation des incertitudes ou de la capacité MMT CN à partir des différents paramètres et également un modèle du rapport de la capacité MMT CN estimée.

Des mesures de trois séries de trois mesures par pièce ont été effectuées sur les dix pièces avec deux MMTs, et les résultats sont traités dans l'outil développé, cet outil a donné des résultats satisfaisants. Mais le temps d'occupation machine par contrôle d'une pièce est long. Pour le gain du temps, une étude de cinq catégories a été effectuée sur les résultats de mesures, et les capacités MMT CN de différentes catégories sont présentées. La catégorie 2S_2M_3P on a diminué énormément le temps sans dégrader la capacité MMT CN comme montré dans les figure 4.11 et figure 4.12.

Dans ce chapitre nous avons développé une méthodologie de mesure et un outil pragmatique d'estimation des incertitudes ou de la capacité MMT CN.

Chapitre 5

Conclusion Générale et Perspectives

Sommaire

5.1 Conclusion Générale	102
5.2 Perspectives.....	103

5.1 Conclusion Générale

Nous avons étudié dans cette thèse, le processus de mesures 3D en métrologie dimensionnelle. L'étude concerne à la partie logicielle de ce processus.

Les apports de ce travail sont multiples, d'abord la vérification de l'hypothèse de la contribution de la partie logicielle dans les résultats de processus 3D, mise en place d'une méthodologie de mesure, et développement d'un outil pragmatique permettant l'estimation des incertitudes ou de la capacité MMT.

Le premier chapitre de ce travail a fait l'objet de l'étude des généralités et l'état de l'art, dans lequel nous avons présenté les machines à mesurer tridimensionnelles à travers les technologies équipées et l'historique. Nous avons défini la métrologie et ses vocabulaires de base. Ont été aussi présentés les besoins de la mesure 3D dans les secteurs et l'évolution de cette technologie avec le développement des nouvelles technologies, ce qui nous a permis de montrer les atouts qu'offre cette technologie. Nous avons défini aussi le tolérancement géométrique, le concept de spécification géométrique de produits. Une présentation des normes ISO GPS a été faite dans cette partie. Nous avons également présenté un état de l'art qui expose quelques travaux déjà réalisés dans la même thématique que notre étude. Ce chapitre va nous permettre de réaliser les premières mesures expérimentales sur des pièces avec les MMTs.

Le deuxième chapitre, est consacré à l'étude expérimentale de mesures physiques, nous avons fait le choix de moyens de mesures. Avant de faire de mesures sur la pièce étalon, une étude préliminaire sur une bague étalon et une pièce a été réalisée et montré l'importance de la qualification du palpeur suivant la forme de la pièce et des éléments géométriques à mesurer. Ensuite nous avons fait l'étude expérimentale sur la pièce étalon avec quatre machines à mesurer tridimensionnelles, deux manuelles et deux à commande numérique, par une méthodologie unique pour toutes les machines, permettant ainsi l'étude des critères d'association d'éléments géométriques, nous avons retenu le critère de moindres carrés. Nous avons montré par une intercomparaison des résultats obtenus de logiciels associés aux MMTs, l'existence des différences entre les résultats d'une machine à l'autre sur un même élément géométrique, et la nécessité de la méthodologie de mesure. L'étude ce chapitre nous a permis en partie de vérifier l'hypothèse de la contribution de la partie logicielle dans les résultats de mesure, et de faire l'étude de mesures virtuelles du troisième chapitre .

Le troisième chapitre est concerné par l'étude de mesures virtuelles de pièces, contrairement au chapitre 2, ici nous avons utilisé seulement les moyens de mesure logiciels. Deux types de pièces ont fait l'objet de ces expériences sont présentés, ainsi que les logiciels utilisés. Nous avons développé une méthodologie de mesures virtuelles qui va permettre la conversion des fichiers de points au format logiciel pour l'obtention des nuages des points

qui constitue la pièce. Le programme de mesures virtuelles par qui les spécifications géométriques seront évaluées a été réalisé.

La première partie de ce chapitre, nous avons montré les écarts dans les résultats de mesure de logiciels par des mesures de plusieurs pièces virtuelles, avec ceux d'autres laboratoires. Dans la deuxième partie, nous avons exposé le cas des facteurs d'influences dans les résultats de mesure 3D en comparant les résultats obtenus aux valeurs nominales, et montré l'importance de la problématique que pose la portée de notre recherche pour les laboratoires de métrologie utilisant les logiciels associés aux MMT. En fin nous avons proposé un modèle de diagramme 5M, pour l'identification des paramètres d'influences d'incertitude dans les résultats de processus de mesures virtuelles.

Le quatrième chapitre est consacré, à l'étude de développement d'une méthodologie et un outil d'estimation des incertitudes ou de la capacité MMT CN, qui va apporter une contribution majeure de notre travail dans la recherche.

Nous avons développé une méthodologie générale, qui va permettre d'effectuer l'analyse du système de mesure à partir des paramètres de variation du système. Pour l'étude expérimentale la réalisation de la CAO du type des pièces expérimentales a été réalisée dans le logiciel CATIA. La CAO et les dix pièces expérimentales fabriquées ont été présentées. Pour réaliser des mesures dans l'art nous avons fait un mode opératoire détaillé, qui sera unique sur les deux MMTs avec lesquelles sont contrôlées les pièces. Nous avons défini les paramètres qui vont permettre l'analyse du système de mesure, l'estimation de la capacité et des incertitudes. Ensuite nous avons développé un outil d'estimation des incertitudes ou de la capacité MMT CN, adapté pour les MMTs à commande numérique. Des mesures de répétabilité machine sur les dix pièces ont été effectuées avec les MMTs par trois séries de trois mesures par pièce. Nous avons expérimenté l'outil par une étude de cinq catégories de mesure, qui aboutira à un gain de temps, et montré ce gain une comparaison de valeurs de la capacité de spécifications de catégories de mesure dans des graphes.

Ce travail montre également l'importance du contrôle dans le cycle de vie d'un produit.

5.2 Perspectives

A l'issue de ce travail de recherche différents points paraissent pertinents.

Tout d'abord sur l'aspect normatif, il serait intéressant que l'ISO normalise le langage de développement des logiciels associés aux MMTs. Au vue la diversification, de l'évolution rapide de ces moyens de mesure poussées et par une demande de plus en plus croissante dans de nouveaux secteurs, cette technologie a besoin de supports normatifs complémentaires.

Il serait souhaitable de poursuivre les recherches entamées dans cette étude sur d'autres types de MMTs, tel que le bras de mesure portable dans plusieurs situations de mesure, puisque le contrôle 3D est de plus en plus demandé dans plusieurs domaines, sur le lieu de travail.

Références Bibliographiques

- [1] Guide to the expression of Uncertainty in Measurement(GUM),
- [2] Vocabulaire international de métrologie(VIM), Concepts fondamentaux et généraux et termes associés 3^{ème} édition JCGM 200:2012,
- [3] ISO/TS 23165 : Spécification géométrique des produits (GPS) — Lignes directrices pour l'estimation de l'incertitude d'essai des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) Première édition 07/15/2006,
- [4] NF EN ISO 15530-3 DÉCEMBRE 2011, Spécification géométrique des produits (GPS), Machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) : Technique pour la détermination de l'incertitude de mesure, Partie 3 : Utilisation de pièces étalonnées ou d'étalons de mesure
- [5] NF EN ISO 15530-4, juillet 2008, Spécification géométrique des produits (GPS), Machines à mesurer tridimensionnelles(MMT) : Technique pour la détermination de l'incertitude de mesure. Partie 4 : Évaluation de l'incertitude de mesure spécifique d'une tâche à l'aide de simulations,
- [7] Pierre BOURDET, Logiciels des machines à mesurer tridimensionnelles, Techniques de l'Ingénieur, R 1316,
- [6] Technologie de machines 3D, MGS 2015,
- [7] NF EN ISO 10360-4 Août 2000, Spécification géométrique des produits (GPS). Essais de réception et de vérification périodique des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT). Partie 4 : MMT utilisées en mode de mesure par scanning,
- [8] Votre guide dans le monde de la métrologie industrielle, Norbert Hanke, Hexagon Metrology,
- [9] Machine de Mesure Tridimensionnelle, manuel de mituyoto
- [10] Measurement technologies in quality control purposes –teaching manual, creafrom, march 2014,
- [11] F. Charpentier : Spécification géométrique des produits, les ISO-GPS, réseau canopé 2015,
- [12] ISO 1101 :2012 : Spécification géométrique des produits (GPS) ; Tolérancement géométrique : Tolérancement de forme, orientation, position et battement,
- [13] Norme ISO 8015 :2011, Spécification géométrique des produits (GPS), Principes fondamentaux : Concepts, principes et règles,

Références Bibliographiques

- [14] Norme ISO 5459 2016 : Tolérancement géométrique : Références spécifiées et systèmes de références spécifiées,
- [15] P.BOURDET, contribution à la mesure tridimensionnelle : Modèle d'indentification géométriques des surfaces, métrologie fonctionnelle des pièces mécaniques, correction géométriques des machines à mesurer tridimensionnelles, sep.96-fév.2005
- [16] Norme ISO 14405-1 :2016, Spécification géométrique des produits (GPS) -- Tolérancement dimensionnel -- Partie 1: Tailles linéaires,
- [18] NF EN ISO 14638 : mars 2015, Spécification géométrique des produits (GPS) : Modèle de matrice,
- [19] Norme ISO 286-1 : 2010 : Spécification géométrique des produits (GPS) -- Système de codification ISO pour les tolérances sur les tailles linéaires -- Partie 1: Base des tolérances, écarts et ajustements,
- [20] NF EN ISO 12181-1 Mai 2011, Spécification géométrique des produits (GPS), Circularité, Partie 1 : Vocabulaire et paramètres de circularité,
- [21] Spécification géométrique des produits (GPS) : Tolérancement géométrique tolérancement de localisation,
- [22] Norme ISO 4288, Spécification géométrique des produits (GPS).État de surface :
Méthode du profil ; Règles et procédures pour l'évaluation de l'état de surface
- [23] Norme ISO 25178-601 :2010, Spécification géométrique des produits (GPS). État de surface : Surfamique, Partie 601 : Caractéristiques nominales des instruments à contact (à palpeur),
- [24] ISO 1938-1 :2015, Spécification géométrique des produits (GPS) -- Équipement de mesure dimensionnel, Partie 1 : Calibres lisses à limite de taille linéaire
- [25] ISO 463:2006, Spécification géométrique des produits (GPS) - Instruments de mesurage dimensionnel : Comparateurs mécaniques à cadran - Caractéristiques de conception et caractéristiques métrologiques,
- [26] ISO 10360-5 :2010, Spécification géométrique des produits (GPS). Essais de réception et de vérification périodique des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) : Partie 5 : MMT utilisant des systèmes de palpée à stylet simple ou à stylets multiples
- [27] Norme ISO 10360-6 : Février 2002, Spécification géométrique des produits (GPS)
Essai de réception et de vérification périodique des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT). Partie 6 : Estimation des erreurs dans le calcul des éléments associés Gaussiens,

Références Bibliographiques

- [28] c.wadel, Guide de référence pour le calcul des incertitudes de mesure sur machine à mesurer tridimensionnelle, 16/02/2006,
- [29] David Janiszek, Cours de Génie Logiciel,
- [30] A.jalid, S.Hariri, J.P.Senelaer, et A.El Gharad, Evaluation des incertitudes de mesures sur une machine à mesurer tridimensionnelle : Nouvelle méthode d'estimation des paramètres de surfaces et incertitudes associées, article 19ème congrès français de mécanique, du 24-28 août 2009, Marseille,
- [31] NF EN ISO 12781-1 Mai 2011, Spécification géométrique des produits (GPS), Planéité, Partie 1 : Vocabulaire et paramètres de planéité,
- [32] NF EN ISO 12781-1 Mai 2011, Spécification géométrique des produits (GPS), Planéité, Partie 2 : Opérateurs de spécification,
- [33] Fékria Romdhani, Thèse de doctorat : Méthodologie d'estimation des incertitudes d'un processus de mesure utilisant un bras polyarticulé portable, le 26 Septembre 2014,
- [34] H. Gheribi, S. Boukebbab, I. Amara, J.M. Linares, Une approche non linéaire pour la construction des calibres virtuels pour MMT, 9ième Congrès de Mécanique, FS Semlalia, Marrakech ; avril 2009,
- [35] Manlay Jean-François, article, une approche pratique des incertitudes de mesure en 3D,
- [36] P.Swornowski, M.Rucki, the errors Occuring in the CMM fitting method, measurement science review, volume 3, section 3, 2003,
- [37] V. Wolff, D. T. Tin, Comparison of a machine of measurement without contact and a CMM : optimization of the process of metrology, TEHNOMUS XVI - New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies, May 2011, Suceava, Romania. pp. 9-14, 2011,
- [38] M. Trenk, M. Franke, Dr. H. Schwenke: The "Virtual CMM" a software tool for uncertainty evaluation – practical application in an accredited calibration lab
- [39] Jean Marc Linares, Jérôme Bachmann, Jean Michel Sprauel : Détermination des incertitudes des surfaces associées, 5 Décembre 2016,
- [40] H. GHERIBI1, S. BOUKEBBAB1, I. AMARA1, J.M. LINARES, Mise en évidence des incertitudes de mesure dans la vérification des tolérances géométriques, Sciences & Technologie B – N°31, Juin 2010, 41-45,
- [41] NF EN ISO 12180-1 Juin 2011, Spécification géométrique des produits (GPS), Cylindricité Partie 1 : Vocabulaire et paramètres de cylindricité,
- [42] NF EN ISO 12180-2 Juin 2011, Spécification géométrique des produits (GPS), Cylindricité, Partie 2 : Opérateurs de spécification,

- [43] NF EN ISO 12181-2 Mai 2011 Spécification géométrique des produits (GPS)
Circularité, Partie 1 : Vocabulaire et paramètres de circularité,
- [44] NF EN ISO 12181-2 Mai 2011, Spécification géométrique des produits (GPS),
Circularité, Partie 2 : Opérateurs de spécification,
- [45] A. Nafi, Vérification et diagnostique des machines à mesurer tridimensionnelles avec
couplage machine et palpeur, thèse 2011,
- [46] Eric Pairel, un logiciel pour la vérification directe du respect des tolérances
géométriques normalisées sur les produits fabriqués,
- [47] Stéphane Raynaud, contrôle tridimensionnelle, édition 2009,
- [48] NF EN ISO 10012, Septembre 2003, Systèmes de management de la mesure : Exigences
pour les processus et les équipements de mesure,
- [49] Bernard Anselmetti, métrologie avec les normes ISO, manuel de tolérancement volume
5,
- [50] Thierry CORTIER, Cotation et GPS ENSIL-Limoge, 2014,
- [51] S.RAYNAUD, Cotation ISO et Chaines de cotes 3D, chapitre 10,
- [52] S.RAYNAUD choix d'un logiciel de contrôle 3D,
- [53] Analyse de système de mesure, 4ème édition, juin 2010.

Publications, Conférences et rencontres

Publications

1. C. N. **MAHAMAT**, S. Raynaud, Y. Mandiang.

Factors of Influence in the Results of 3D Measurements : Software Associated with Coordinate Measuring Machines. International, British Journal of Applied Science & Technology, 20(5) : 1-8, 2017, publié le 02/05/2017.

2. C. N. **MAHAMAT**, S. Raynaud, Y. Mandiang.

Pragmatic approach for estimating measurement uncertainties or the capability of CMM s NC. International Journal of Current Research, Vol. 9, Issue, 07, 54513-54519, July, 2017, publié le 31 juillet 2017.

Conférences et rencontres

3. C. N. **MAHAMAT**, S. Raynaud, Y. Mandiang.

Quels outils et méthodes pour l'estimation des incertitudes de mesures sur MMT.

Rencontres francophones sur la qualité et la mesure du 28 au 30 avril 2015 à Angers(France).

4. C. N. **MAHAMAT**, S. Raynaud, Y. Mandiang.

Estimation des incertitudes de mesures 3D liées aux outils logiciels. Conférence Internationale de Métrologie CAFMET2016.à Dakar(Sénégal).

Annexe I : Quelques résultats d'intercomparaison de mesures virtuelles

Pour la partie étalon logiciel, nous avons trouvé que le moyen de tester les logiciels c'est de faire une intercomparaison de logiciels de mesures 3D, associés aux MMTs, en effectuant de mesures virtuelles. Pour voir si les logiciels de mesure 3D mesurent-ils la même chose ? Et pour la confirmation ou non de l'hypothèse que la partie logicielle contribue une d'influence dans les résultats de mesure, et que les contrôleurs 3D doivent tenir en compte lors d'estimation des incertitudes. Dans cette optique, nous avons réalisé de mesures virtuelles de pièces à l'aide de nuages des points. Mais aussi d'autres laboratoires qui ont voulu de s'assurer de mesures de leurs logiciels, ont également participé à cette intercomparaison.

La figure I.1, présente la CAO du type des pièces virtuelles.

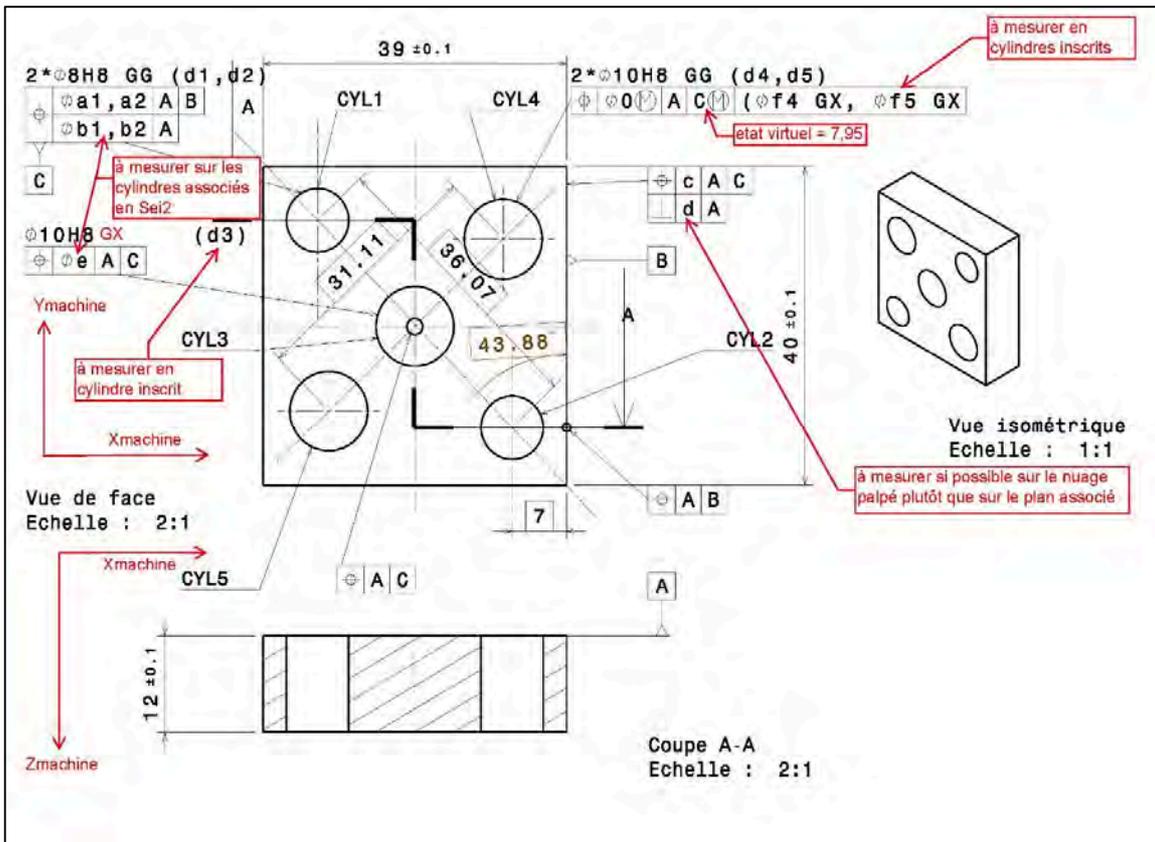


Figure I. 1 CAO du type des pièces Virtuelles

Annexes

Un exemple des points à convertir à l'aide d'une macro, en nuages de points est présenté dans la figure I.2

raw		
102		
0		
109.99974186044	100.001421179027	181.24889916471
109.99974186044	100.001421179027	181.24889916471
108.84969186044	129.527291179027	185.81425916471
108.84969186044	129.527291179027	185.81425916471
141.84982186044	129.528081179027	185.84743916471
141.84982186044	129.528081179027	185.84743916471
125.34888186044	122.527841179027	185.83857916471
125.34888186044	122.527841179027	185.83857916471
115.34868186044	112.528001179027	185.84321916471
115.34868186044	112.528001179027	185.84321916471
135.34885186044	112.527991179027	185.85337916471
135.34885186044	112.527991179027	185.85337916471
125.34872186044	102.527891179027	185.85601916471
125.34872186044	102.527891179027	185.85601916471
108.84944186044	95.5273711790268	185.85294916471
108.84944186044	95.5273711790268	185.85294916471
141.84956186044	95.5281811790268	185.85976916471
141.84956186044	95.5281811790268	185.85976916471
113.24857979697	129.028193025324	187.00220316184
113.24857979697	129.028193025324	187.00220316185
116.53652979697	125.538603025324	187.834643161839

Figure I. 2 : Exemple des points à convertir en nuages de points

Quelques résultats d'inter-comparaison de mesures virtuelles de différents logiciels sont présentés dans les tableaux suivants :

Le Tableau I.1 présente l'évaluation de quelques éléments et spécifications géométriques, par les logiciels de différents laboratoires de la pièce 1.

Tableau I. 1 : Eléments et spécifications géométriques de la pièce 1 évalués par les logiciels

Pièce	Qui	Où	Logiciel	$\Phi d1$	$\Phi d3$	$\Phi a1$	$\Phi a2$
1	Pairel	Symme	Géovérif	8,028	10,020	0,126	0,126
1	Nicola	Symme	Mahr K-Mess	8,028	10,026	nc	nc
1	Charfadine	MIP2	Metrolog XG 6	8,028	10,02	0,135	0,109
1	Charfadine	MIP2	Metrolog XG14	8,028	10,026	0,114	0,072
1	Charfadine	MIP2	Metrolog XG13	8,023	10,014	0,164	0,197

Eléments géométriques type diamètre

Spécification géométrique :
Cylindricité

Le Tableau I.2, nous présentons quelques éléments et spécifications géométriques évalués par les logiciels de différents laboratoires de la pièce 2.

Tableau I. 2 : Eléments et spécifications géométriques évalués de la pièce 2 par les logiciels

Pièce	Qui	Où	Logiciel	$\Phi d1$	$\Phi d3$	d	e
2	Pairel	Symme	Géovérif	8,026	10,014	0,018	0,018
2	Nicola	Symme	Mahr K-Mess	8,026	10,022	nc	0,023
2	Charfadine	MIP2	Metrolog XG 14	8,026	10,022	0,009	0,029
2	Charfadine	MIP2	Metrolog XG 13	8,026	10,015	0,010	0,029

Eléments géométriques type diamètre

Spécifications géométriques :
d : perpendicularité
e : Localisation

Annexe II : Outil d'estimation d'incertitudes ou de la capacité MMT CN et les différentes catégories de traitement des résultats pour l'estimation de la capacité MMT CN

Dans cette annexe II, nous présentons d'abord le banc de montage de processus de mesures sur MMT. Et ensuite les différentes catégories de traitements de résultats de mesure de deux machines à mesurer tridimensionnelles à commande numérique.

Le banc de montage de processus de mesures, commence le calibrage du palpeur.

La figure II.1, présente le calibrage des palpeurs sur les deux MMTs.

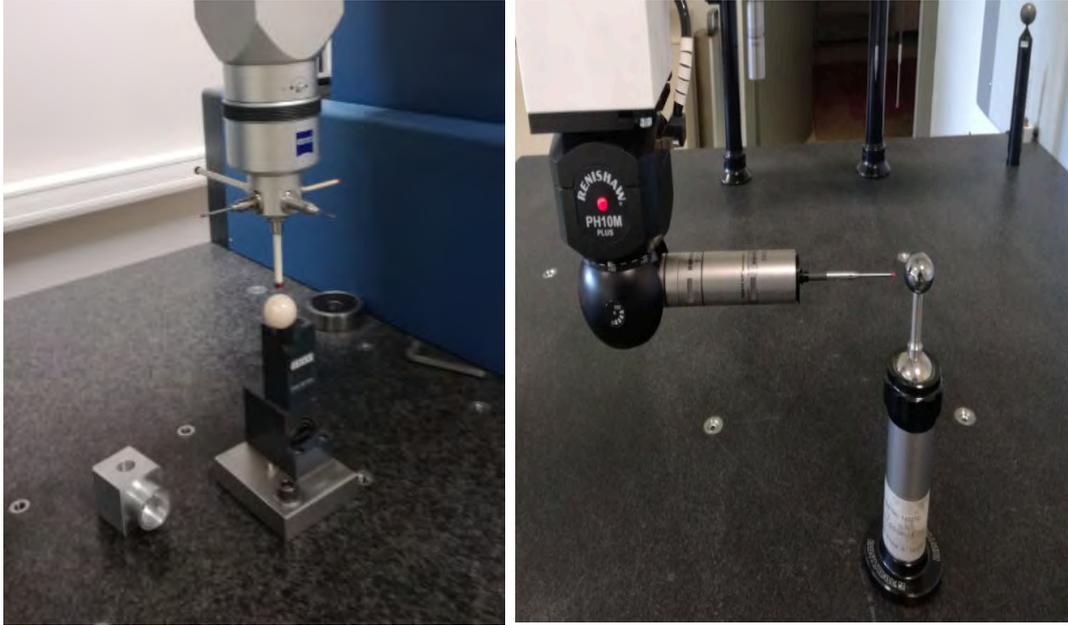


Figure II. 1- Calibrage des palpeurs sur les deux MMTs CN

La figure II.2, montre le banc de montage de processus de mesures 3D sur les deux MMTs. Elle montre également des mesures par commande numérique, effectuées par l'opérateur et en automatique.



Figure II. 2- Banc de montage de mesures 3D expérimentales

Annexes

La figure II.3, présente les incertitudes-types et élargies estimées d'une Coaxialité de la catégorie de trois séries de trois mesures de dix pièces (3S_3M_10P), de la MMT Nikon.

Estimation des incertitudes										
Pièces										
Séries	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
US1	5,77E-04	5,77E-04	5,77E-04	0,00E+00	1,00E-03	5,77E-04	0,00E+00	2,89E-03	2,65E-03	1,00E-03
US2	5,8E-04	0,0E+00	5,8E-04	5,8E-04	5,8E-04	5,8E-04	4,4E-03	5,8E-04	3,2E-03	0,0E+00
US3	2,35E-04	7,06E-04	4,71E-04	2,35E-04	1,23E-18	2,35E-04	2,35E-04	1,65E-03	4,71E-04	2,36E-04
Up pièces	1,70E-03	1,82E-03	1,89E-03	1,25E-03	2,31E-03	1,70E-03	8,73E-03	6,75E-03	8,38E-03	2,05E-03

Figure II. 3- Incertitudes estimées

La figure II.4, présente la capacité MMT Nikon estimée sur une Coaxialité.

Rapport d'estimation de la Capabilité MMT																						
Nom pièce: mpm			Nom machine:			Date: 10/7/17		Enregistrer														
Type de pièces:			ID machine:			No rapport: 42926/mpm/3		Obtenir N° Rapport														
Spécification évaluée:			Réalisé par: xxxxxxxx					3														
Nbre de Séries		3		Nbre de pièces(n):		5		nombre des mesures(r):														
K1 = 0,5908		K2 = 0,5231		K3 = 0,403		Rp = 0,014																
R = 0,0021		ΔX = 0,0011																				
Analyse de paramètres						Variation en %																
Variation de la Répétabilité (EV) MMT						<table border="1"> <tr> <th>mesures</th> <th>K1</th> <th>% EV = 100 [EV/TV]</th> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,8862</td> <td>= 100 [0,00126/0,00578]</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0,5908</td> <td>= 21,8 %</td> </tr> </table>					mesures	K1	% EV = 100 [EV/TV]	2	0,8862	= 100 [0,00126/0,00578]	3	0,5908	= 21,8 %			
mesures	K1	% EV = 100 [EV/TV]																				
2	0,8862	= 100 [0,00126/0,00578]																				
3	0,5908	= 21,8 %																				
$EV = R \times K1$ $= 0,0021 \times 0,5908$ $= 0,00126$																						
<table border="1"> <tr> <th>Série</th> <th>K2</th> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,7071</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0,5231</td> </tr> </table>						Série	K2	2	0,7071	3	0,5231											
Série	K2																					
2	0,7071																					
3	0,5231																					
Variation de la Répétabilité						<table border="1"> <tr> <th>Pièces</th> <th>K3</th> <th>% GR = 100 [GR/TV]</th> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0,7071</td> <td>= 100 [0,00126/0,00578]</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0,5231</td> <td>= 21,8 %</td> </tr> </table>					Pièces	K3	% GR = 100 [GR/TV]	2	0,7071	= 100 [0,00126/0,00578]	3	0,5231	= 21,8 %			
Pièces	K3	% GR = 100 [GR/TV]																				
2	0,7071	= 100 [0,00126/0,00578]																				
3	0,5231	= 21,8 %																				
$GR = (EV^2)^{0,5}$ $= (0,00126^2)^{0,5}$ $= 0,00126$																						
Variation de pièces (PV)						<table border="1"> <tr> <th>Pièces</th> <th>K3</th> <th>% PV = 100 [PV/TV]</th> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0,5231</td> <td>= 100 [0,00564/0,00578]</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0,4467</td> <td>= 97,59 %</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0,403</td> <td></td> </tr> </table>					Pièces	K3	% PV = 100 [PV/TV]	3	0,5231	= 100 [0,00564/0,00578]	4	0,4467	= 97,59 %	5	0,403	
Pièces	K3	% PV = 100 [PV/TV]																				
3	0,5231	= 100 [0,00564/0,00578]																				
4	0,4467	= 97,59 %																				
5	0,403																					
$PV = Rp \times K3$ $= 0,014 \times 0,403$ $= 0,00564$																						
Variation totale (TV)						<table border="1"> <tr> <th>Pièces</th> <th>K3</th> <th>ndc = 1,41 (PV/GR)</th> </tr> <tr> <td>7</td> <td>0,3534</td> <td>= 1,41 (0,00564/0,00126)</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>0,3375</td> <td>= 6,312</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>0,3249</td> <td>= 6</td> </tr> </table>					Pièces	K3	ndc = 1,41 (PV/GR)	7	0,3534	= 1,41 (0,00564/0,00126)	8	0,3375	= 6,312	9	0,3249	= 6
Pièces	K3	ndc = 1,41 (PV/GR)																				
7	0,3534	= 1,41 (0,00564/0,00126)																				
8	0,3375	= 6,312																				
9	0,3249	= 6																				
$TV = (GR^2 + PV^2)^{0,5}$ $= (0,00126^2 + 0,00564^2)^{0,5}$ $= 0,00578$																						
Commentaire du Contrôleur:						Decision																

Figure II. 4– Capabilité MMT estimée

Annexes

La figure II.5, montre le modèle de saisie des résultats pour l'estimation des incertitudes ou de la capacité MMT, de la catégorie 3S_3M_5P proposée.

Les résultats saisis dans ce modèle sont d'un parallélisme évalué.

Saisie des résultats pour l'estimation des incertitudes ou de la capacité MMT							
Séries	Mesures	N° de pièces					Moyenne
		1	2	3	4	5	
S1	1	0,043	0,028	0,046	0,041	0,032	0,038
	2	0,046	0,029	0,046	0,037	0,034	0,038
	3	0,042	0,029	0,047	0,039	0,033	0,038
	Moyenne	0,044	0,029	0,046	0,039	0,033	$\bar{X}_{S1} = 0,038$
	Etendue	0,004	0,001	0,001	0,004	0,002	$R_{S1} = 0,002$
S2	1	0,039	0,037	0,046	0,040	0,032	0,039
	2	0,040	0,035	0,045	0,043	0,032	0,039
	3	0,040	0,032	0,045	0,039	0,032	0,038
	Moyenne	0,040	0,035	0,045	0,041	0,032	$\bar{X}_{S2} = 0,038$
	Etendue	0,001	0,005	0,001	0,004	0,000	$R_{S2} = 0,002$
S3	1	0,040	0,033	0,047	0,041	0,034	0,039
	2	0,040	0,034	0,046	0,043	0,033	0,039
	3	0,038	0,033	0,048	0,043	0,035	0,039
	Moyenne	0,039	0,033	0,047	0,042	0,034	$\bar{X}_{S3} = 0,039$
	Etendue	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	$R_{S3} = 0,002$
Moyennes de pièces		0,041	0,032	0,046	0,041	0,033	$\bar{X} = 0,039$
Max $\bar{X} = 0,04$		Min $\bar{X} = 0,04$		$\Delta\bar{X} = 0,00$		$R_p = 0,01$	$R = 0,0021$

Figure II. 5 – Modèle de saisie des résultats pour l'estimation des incertitudes ou de la capacité MMT : Catégorie 3S_3M_5P.

Dans la figure II.6, nous présentons les incertitudes-types et élargies estimées de la catégorie 3S_3M_5P.

Estimation des incertitudes-types et élargies					
Séries	pièces				
	1	2	3	4	5
US1	2,08E-03	5,77E-04	5,77E-04	2,00E-03	1,00E-03
US2	5,8E-04	2,5E-03	5,8E-04	2,1E-03	0,0E+00
US3	9,42E-04	2,35E-04	7,08E-04	4,73E-04	7,08E-04
Up pièces	4,71E-03	5,19E-03	2,16E-03	5,85E-03	2,45E-03

Figure II. 6– Incertitudes estimées de la catégorie : 3S_3M_5P

RESUME

En métrologie dimensionnelle, les machines à mesurer tridimensionnelles se sont largement répandues, dans les laboratoires de recherche en métrologie et dans les ateliers. Les logiciels associés à ces machines ont grandement progressé. Très peu de calculs d'incertitudes ou de la capacité sont aujourd'hui effectués selon les règles de l'art dans les milieux industriels et scientifiques.

Cette étude de développement d'un outil d'aide aux calculs des incertitudes de mesures des processus de contrôle tridimensionnel devra se faire à partir de plusieurs types mesures 3D et essais :

- la réalisation des mesures physiques d'une pièce étalon (test) sur deux types de machines à mesurer tridimensionnelles (MMTs), manuelles et à commande numériques.
- une comparaison des moyens de mesure 3D.
- la réalisation de mesures virtuelles des pièces à l'aide des nuages des points par plusieurs logiciels de mesure 3D.
- la confirmation des facteurs d'influences dans les résultats de mesures 3D dus à la partie logicielle.
- la réalisation des mesures 3D de dix (10) pièces identiques sur deux MMTs à commande numérique.

A partir un certain nombre des paramètres de variation du système de mesure, un outil d'estimation des incertitudes des résultats de mesures ou de la capacité MMT CN a été développé. Les résultats sont satisfaisants par rapports aux objectifs de l'étude.

Les résultats de ces travaux de recherche, ont l'objet de deux publications dans des revues scientifiques, et une communication orale dans une conférence internationale.

Mots clés : Métrologie, incertitudes, machines à mesurer tridimensionnelles, facteurs d'influences, mesure 3D, pièces, mesures virtuelles, nuages de points, spécifications géométriques.

ABSTRACT

In dimensional metrology, coordinate measuring machines have spread widely in the metrology research laboratories and workshops. The software associated with these machines has made great progress. Very few calculations of uncertainties or capability are now carried out according to the rules of the art in industrial and scientific circles.

This study of development a tool to help calculations of measurement uncertainties in three-dimensional control processes.

- the realization of the physical measurements of a standard part (test) on two types of three-dimensional measuring machines (CMMs), manual and numerically controlled.
- a comparison of the 3D measurement means.
- the realization of virtual measurements of the pieces using the point clouds by several software of measurement 3D.
- the confirmation of the influencing factors in the results of 3D measurements due to the software part.
- the realization of 3D measurements of ten (10) identical parts on two CMMs with numerical control.

From a certain number of the parameters of variation of the measurement system, a tool of estimation of the uncertainties of the measurement results of the capability CMM NC was developed. The results are satisfactory in relation to the objectives of the study.

The results of this research are the subject of two publications in scientific journals, and a paper in an international conference.

Keywords : Metrology, uncertainties, coordinate measuring machines, Factors of influence, 3D measurement, parts, Virtual measures, clouds of points, geometrics specifications.