L'étalonnage des machines à mesurer tridimensionnelles : matrice de correction et incertitudes

Résumé : Cette thèse s`inscrit dans une démarche métrologique dans le sens où il s`agit de déterminer la matrice de correction pour l'étalonnage de la machine à mesurer tridimensionnelle en se basant sur la norme ISO 10360-2. Par rapport à la méthode d'étalonnage par interférométrie laser, la méthode d'étalonnage selon la norme10360-2, présente l'avantage d'introduire toutes les sources d'erreurs y compris la configuration du palpeur. Dans la 2eme partie, nous présentons la mise au point et le mode opératoire des mesures effectuées selon la norme 10360-2. Ces résultats seront modélisés sous formes d'une matrice de corrections. Celle-ci pourra être introduite dans le logiciel de calcul de MMT pour tenir compte des corrections possibles lors de contrôle des spécifications dimensionnelles et géométriques des pièces mécaniques. La troisième partie a été consacrée à l'étude de l'évaluation d`incertitude de mesure relative à cette matrice de correction via les deux approches analytique « GUM » et numérique Monte Carlo « MCM ». Les résultats des deux approches seront comparés et validés pour un intervalle de confiance de 95¨%. Finalement, nous avons proposé un modèle mathématique global de correction qui a été démontré et validé par comparaison des mesures effectuées sur la machine MMT de l'ENSET à celles d'un autre laboratoire accrédité ISO 17025, par la mesure d'un entraxe sur une cale étalon.

Mots clés : Machine à mesurer tridimensionnelle, incertitude de mesure, ISO 10360-2, Méthode GUM, Simulation Monte Carlo, Comparaison inter-laboratoires, déclaration de conformité.

Abstract: The manuscript is part of a metrological approach in the sense that it is a matter of determining the CMM calibration correction matrix based on standard ISO 10360-2, Compared to the laser interferometry calibration method, this calibration method according to standard 10360-2 has the advantage of introducing all sources of errors including the probe configuration. The second part presents the experimental work performed during this thesis. The development and operation of the measurements performed according to standard ISO 10360-2 are presented. The results will be modelled in the form of a correction matrix and will be introduced into the CMM calculation software to take into account possible corrections when checking the dimensional and geometric specifications of mechanical parts. The third part was focused on a study conducted on the evaluation of measurement uncertainty related to this correction matrix using the two analytical approaches GUM and Monte Carlo numerical. The two results of the approaches are compared and validated for a 95% confidence interval. Finally, we proposed a global mathematical model for the calibration of CMM. The proposed model is demonstrated and validated by comparing measurements made on our CMM and in another laboratory by measuring a distance between centers on a slip gauge.

Keywords: Coordinate measuring machine, uncertainty of measurement, ISO 10360-2, GUM, Monte Carlo method, comparison inter-laboratory, declaration of conformity.

Kaoutar BAHASSOU

L'étalonnage des machines à mesurer tridimensionnelles : matrice de correction et incertitudes

N° thèse : 202/ST2I

Année : 2021

Année : 2021

Thèse N° : 202/ST2I

جامعة محمد الخامس بالرباط
Université Mohammed V de Rabat

École Nationale Supérieure d'Informatique et d'Analyse des Systèmes
Centre d'Études Doctorales en Sciences des Technologies de l'Information et de l'Ingénieur

THÈSE DE DOCTORAT

L'ETALONNAGE DES MACHINES A MESURER TRIDIMENSIONNELLES : MATRICE DE CORRECTION ET INCERTITUDES

Présentée par

Kaoutar BAHASSOU

Le 13/03/2021

Formation doctorale : Sciences de l'Ingénieur - Génie Mécanique
Structure de recherche : Laboratoire de Mécanique Appliquée et Technologies, Équipe Procédés et Contrôles Mécaniques et Thermiques, ENSAM de Rabat

JURY

Professeur Khalid EL BIKRI PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat	**Président**
Professeur Abdelouahhab SALIH PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat	**Directeur de thèse**
Professeur Abdelilah JALID PH, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat	**Co-Directeur de thèse**
Professeur Abdellah BOUALAM PH, ENSEM, Université Hassan II de Casablanca	**Rapporteur**
Professeur Mohammed RADOUANI PES, ENSAM, Université Moulay Ismail de Meknès	**Rapporteur**
Professeur El Bekkaye MERRIMI PH, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat	**Rapporteur**
Professeur Mourad TAHA JANAN PES, ENSAM, Université Mohammed V de Rabat	**Examinateur**

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE 11
CHAPITRE I : Etude Bibliographique 13
Introduction 14
1. La machine à mesurer tridimensionnelle 14
1.1. Historique de la machine à mesurer tridimensionnelle 14
1.2. Structure des machines à mesurer tridimensionnelles 16
1.2.1. Types des machines à mesurer tridimensionnelles 16
1.2.2. Constitution d'une MMT 17
1.2.3. Pourquoi choisir la mesure par MMT ? 23
1.3. Analyse des performances des machines à mesurer tridimensionnelles 24
1.3.1. Erreur de mesure 25
1.3.2. L'incertitude de mesure 25
1.4. Les sources d'erreurs 26
1.4.1. L'environnement 26
1.4.2. La structure et la technologie de la machine 27
1.4.3. Les conditions de fonctionnement 28
1.4.4. La stratégie ou gamme de mesure 29
2. Etalonnage des machines à mesurer tridimensionnelles 29
Conclusion 37
CHAPITRE II : Vérification de la MMT selon la norme ISO 10360-2 39
Introduction 40
1. La norme ISO 10360 41
1.1. Les sources d'erreur de la MMT 41
1.1.1. Les erreurs géométriques de la MMT 42
1.1.2. Erreur ou incertitude 42
1.1.3. L'incertitude de mesure 43
1.1.4. L'ISO 10360 et les erreurs géométriques de la MMT 46
1.1.5. Les tests d'acceptation de la norme ISO 10360-2 47
1.2. Détermination de la valeur corrigée 66
CHAPITRE III : Calcul des incertitudes de mesures 73
Introduction 74
1. Évaluation des incertitudes de mesures par l'approche GUM 75
1.2. Les étapes de la méthode GUM 75
1.3. Evaluation de l'incertitude associée à la valeur corrigée par la méthode GUM 77
1.3.1. Détermination de l'incertitude type uc 77
1.3.2. Détermination de l'incertitude élargie 84
2. Evaluation des incertitudes de mesures par l'approche de Monte-Carlo 86

Sommaire

2.1. Présentation de la méthode MCM 87
2.1.1. Estimation des incertitudes selon la MCM 87
2.1.1.1. Générateur de nombres aléatoires 87
2.1.1.2. Calcul des résultats 88
2.2. Application de l'approche de Monte-Carlo sur le modèle de correction 89
2.2.1. Principe de calcul 89
2.2.1.1. Choix des distributions pour les grandeurs d'entrée et de sortie 90
2.2.1.2. Générateur de nombres aléatoire 91
2.2.1.3. Résultats et interprétations 92
3. Comparaison des deux méthodes d'évaluation des incertitudes de mesures 94
Conclusion 97
CHAPITRE IV : Validation expérimentale 98
Introduction 99
1. Modélisation de la position de la cale étalon dans l'espace de mesure 99
1.1. Position nominale de la cale étalon dans le système de coordonnées de la MMT 99
1.2. Système d'identification 100
1.3. Résultats de mesure et d'identification 101
1.3.1. Calcul de l'erreur modèle 103
1.3.2. Calcul de l'incertitude associée au modèle proposé 104
2. Comparaison inter-laboratoires 105
2.1. Pourquoi participer à une comparaison inter-laboratoires ? 107
2.2. Evaluation de la performance de la méthode de correction par Comparaison inter-laboratoires 108
2.2.1. Mesurer l'entraxe sur la machine MMT (ENSET-RABAT) 109
2.2.1.1. Gamme de mesurage de l'entraxe 110
2.2.1.2. Calcul de l'incertitude associée de la valeur mesurée 111
2.2.2. Mesure de l'entraxe au laboratoire AirMetrologie 111
2.2.2.1. Mesure de l'entraxe par la machine optique TESA 111
2.2.2.2. Calcul de l'incertitude associée de la valeur mesurée du laboratoire AirMetrologie 112
2.2.3. Comparaison des résultats entre MMT ENSET et AirMetrologie 114
3. Déclaration de conformité avec risque 115
Conclusion 119
CONCLUSION GENERALE 117
BIBLIOGRAPHIE 119

Liste des figures

Figure 1 : La machine MMT installée au laboratoire de métrologie de l'ENSET 17
Figure 2 : Composants de la machine de mesure 18
Figure 3 : Schéma de palpeur à déclenchement 21
Figure 4 : Les 22 lignes de déplacement pour identifier les 21 écarts géométriques de la MMT 30
Figure 5 : Les 15 positions de mesures pour identifier les 2 écarts géométriques 31
Figure 6 : Les positions de mesure pour la calibration de la MMT à l'aide d'une barre à trous. 32
Figure 7 : Vérification de la MMT à l'aide d'une barre à billes télescopique 32
Figure 8 : Montage pour la vérification de MMTs de grandes tailles 33
Figure 9 : Schéma représentatif de la méthode développée par J.P. Kruth 34
Figure 10 : Trois positions de Laser tracker dans le volume de mesure de la machine : positions de suivi 34
Figure 11 : Les sept positions de mesures du calibre étagé proposées par le document ASME B89.4.10360.2-2008 35
Figure 12 : Quatre positions de la plaque à trous et six mesures utilisées en appliquant la méthode PTB 36
Figure 13 : Le schéma cinématique spatial pour le modèle nominal de la MMT de topologie WFYXZT 37
Figure 14 : Schéma de la méthode des 5 M 46
Figure 15 : Les 25 points palpés sur la sphère selon la norme 10360-2 50
Figure 16 : Méthode d'association des surfaces pour le cas d'une sphère. 52
Figure 17 : Machine à mesurer tridimensionnelle utilisée 59
Figure 18 : Repère mesure et repère machine 60
Figure 19 : Les lignes de mesure de l'erreur de taille selon la norme 103360-2 61
Figure 20 : Les résultats du test d'acceptation sur l'erreur de taille selon la norme ISO10360-2 65
Figure 21 : La moyenne des mesures suivant la direction X 68
Figure 22 : Courbe d'étalonnage de la valeur lue suivant la direction x 68
Figure 23 : Schématisation de la méthode MCM pour le calcul des incertitudes 89
Figure 24 : Interface de Mc-Ed (cale de 250mm suivant la direction x) 91
Figure 25 : Les résultats de simulation de MCM 92
Figure 26 : Simulation de l'incertitude de mesure par la méthode de Monté Carlo suivant la direction x et pour la cale 250mm 93
Figure 27 : Position i de la cale étalon dans le volume de mesure de la MMT 99
Figure 28 : Densité de probabilité de la valeur corrigée associée à la valeur conventionnelle 125 suivant la direction xyz 102
Figure 29 : Montage de la pièce à contrôler sur marbre de la machine à mesurer tridimensionnelle (ENSET-RABAT) 109
Figure 30 : Définition des éléments géométriques mesurés sur la pièce à contrôler 111
Figure 31 : Définition des distances à mesurer sur la machine optique de AirMterology 112
Figure 32 : Mesure sur la machine optique du laboratoire AirMetrologie 112
Figure 33 : Les types de spécifications a), b) et c) 116
Figure 34 : Loi normale de la valeur de référence 125mm 119

Liste Des Tableaux

Tableau 1 : Tableau des incertitudes des lois de probabilités usuelles 44
Tableau 2 : La distance radiale des 25 points palpés sur la sphère 51
Tableau 3 : Tableau des écarts ξi entre la distance radiale des 25 points et le rayon nominale de la sphère 56
Tableau 4 : Les résultats du test d'acceptation sur l'erreur de palpage selon la norme ISO10360-2 57
Tableau 5 : Tableau des incertitudes sur les grandeurs affectant l'erreur de palpage. 58
Tableau 6 : Les résultats de mesure des 5 cales suivant les 7 positions de la norme 10360-2 62
Tableau 7 : Tableau des incertitudes sur les grandeurs affectant l'erreur de taille 64
Tableau 8 : Tableau des coefficients des droites d'étalonnage suivant les 7 positions de la norme ISO10360-2 69
Tableau 9 : Les valeurs corrigées par le modèle de correction 70
Tableau 10 : Les erreurs modèles entre la valeur corrigée par le modèle et la valeur de référence 71
Tableau 11 : Extrait MTH 2301 Méthodes statistiques de bernard Clement Nov 2002 81
Tableau 12 : Tableau des incertitudes sur les coefficients Ai et Bi suivant les 7 directions 82
Tableau 13 : Tableau des incertitudes sur le coefficient de corrélation entre A et B 82
Tableau 14 : Tableau des incertitudes sur le coefficient de corrélation entre A et Vlue 83
Tableau 15 : Tableau des incertitudes sur le coefficient de corrélation entre B et Vlue 83
Tableau 16 : Tableau des incertitudes type sur la valeur corrigée 84
Tableau 17 : Tableau des incertitudes élargies sur la valeur corrigée 85
Tableau 18 : Tableau des résultats GUM et MCM 95
Tableau 19 : Les valeurs de D_{low} et D_{high} pour les différentes cales et suivant les 7 directions 96
Tableau 20 : Résultats d'étalonnage, suivant les 7 directions réalisé, sur MMT 102
Tableau 21 : Les erreurs modèles entre la valeur corrigée par matrice de correction et la valeur de référence 103
Tableau 22 : Les incertitudes type et élargies associées à la matrice de correction 104
Tableau 23 : Les résultats de comparaison inter-laboratoires entre MMT-ENSET RABAT et AirMetrologie 114
Tableau 24 : Les résultats de déclaration de conformité avec risque de la méthode 118

MMT: « Machine à mesurer tridimensionnelle »
GUM: guide pour l'incertitude de mesure
MCM: « Méthode de Monte Carlo»
BIPM: bureau internationnal des poids et de mesures
VIM: « Vocabulaire international de métrologie »
P_{stu}: erreur de taille unique du stylet
$E_{l,MPE}$:erreur maximale toléré de la machine
$P_{ftu,MPF}$: erreur maximale tolérée sur l'erreur de palpage
M_{thi}: point théorique de la surface fabriquée
n_i: vecteur normale
ξ_i: ecart entre un point mesuré Mi et le point theorique Mthi correpondant
Ep: erreur de palpage
M_{pep}: « Erreur de palpage maximale toléré »
U_{ep}: incertitude élargie sur l'erreur de palpage
u_c: incertitude type composé sur l'erreur de palpage
EMT: erreur maximale toléré sur les longueurs
E_t: erreur de taille
R_0: répétabilité
E_{et}: incertitude élargie sur l'erreur de taille
A_i: le coefficien directeur de la droite d'etalonnage suivant la direction i
B_i: l'ordonnée à l'origine de la courbe d'étalonnage suivant la direction i
$V_{lue/i}$: la valeur lue suivant la direction i
E_i: erreur modele
V_{ref}: valeur de reference
$P_{/i}$: droite de modélisation suivant la direction i
V_c: valeur corrigée par le modele
u_{vc}: incertitude type composé sur la valeur corrigée
u_{vlue}: « Incertitude type sur la valeur lue »
u_b: « Incertitude type sur le coefficient b »
u_a : incertitude type sur le coefficient a
δ: degré d'approximation
D_{low}: difference inférieur
D_{high}: difference supérieur
$Y_{low/gum}$: intervalle inférieur GUM
$Y_{high/gum}$: intervalle supérieur GUM
$Y_{low/mcm}$: intervalle inférieur mcm
$Y_{high/mcm}$: intervalle supérieur mcm
J:matrice des projection des points mésurées dans l'espace
J^t: transposé de la matrice J
E_n: écart normalisé

A Mon cher père et ma chère Mère

A mon frère

A mon cher mari

Votre Amour, votre aide, votre soutien et vos encouragements ont toujours été pour moi une source de confiance et une raison qui me pousse à donner le meilleur de moi.

Qu'elle me soit permise aujourd'hui à travers ce modeste travail de vous rendre fiers et de vous exprimer mon profond amour et ma grande reconnaissance. J'implore Dieu qu'il vous apporte bonheur, santé et longue vie. A vous je dédie ce travail.

A tous mes oncles et tantes, à tous mes cousins et cousines, à mes amis, à tous ceux et celles qui me sont chers, à tous les enseignants tout au long de mes études, et à tous ceux que ma réussite leur tient à cœur

Qu'ils trouvent ici, le témoignage de tout mon amour et toute ma gratitude pour leur inlassable soutien. Je vous souhaite une vie pleine de réussite, de santé et de bonheur.

A vous tous je dédie ce travail.

Mes remerciements et mes gratitudes vont au premier lieu à mon cher professeur Abdelouahhab SALIH, le directeur de ma thèse qui m'a soutenu tout au long de cette aventure, ses conseils avisés, ses critiques pertinentes et ses qualités humaines m'ont été d'une très grande utilité pour mener à terme ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude et de ma reconnaissance.

Je remercie vivement et chaleureusement mon professeur Mohamed OUBREK pour son aide précieuse, son soutien indéfectible et pour toutes les connaissances acquises auprès de lui. Sa compétence a toujours été pour moi une source d'encouragement et qui a bien su me communiquer son enthousiasme et sa motivation.

Je tiens également à adresser mes remerciements les plus sincères aux honorables professeurs Mr. Abdelilah JALID, Mr. Mourad TAHA JANAN et Mr. Hassan ELKOURSI pour le temps et l'attention qu'ils ont eu la gentillesse d'accorder à ce travail de recherche et de m'avoir fait profiter de leur expérience, leur aide précieuse et leur conseil.

Je n'oublierai surtout pas de remercier infiniment tous le corps professoral et administratif de ma chère école ENSET pour leurs efforts considérables dans le but de réussir ces années de formation.

Je remercie mes chers parents pour le soutien qu'ils m'ont apporté tout au long de mon parcours. Ce travail est le fruit de leurs encouragements et de leur confiance.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui m'ont, de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre, par leur collaboration, leur soutien et leur avis judicieux, permis de mener à bien ce travail.

Abstract

The manuscript is part of a metrological approach in the sense that it is a matter of determining the CMM calibration correction matrix based on standard ISO 10360-2, Compared to the laser interferometry calibration method, this calibration method according to standard 10360-2 has the advantage of introducing all sources of errors including the probe configuration.

The second part presents the experimental work performed during this thesis. The development and operation of the measurements performed according to standard ISO 10360-2 are presented. The results will be modelled in the form of a correction matrix and will be introduced into the CMM calculation software to take into account possible corrections when checking the dimensional and geometric specifications of mechanical parts.

The third part was focused on a study conducted on the evaluation of measurement uncertainty related to this correction matrix using the two analytical approaches GUM and Monte Carlo numerical. The two results of the approaches are compared and validated for a 95% confidence interval.

Finally, we proposed a global mathematical model for the calibration of CMM. The proposed model is demonstrated and validated by comparing measurements made on our CMM and in another laboratory by measuring a distance between centers on a slip gauge.

Keywords: Coordinate measuring machine, uncertainty of measurement, ISO 10360-2, GUM, Monte Carlo method, comparison inter-laboratory, declaration of conformity.

Cette thèse s`inscrit dans une démarche métrologique dans le sens où il s`agit de déterminer la matrice de correction pour l'étalonnage de la machine à mesurer tridimensionnelle en se basant sur la norme ISO 10360-2. Par rapport à la méthode d'étalonnage par interférométrie laser, la méthode d'étalonnage selon la norme10360-2, présente l'avantage d'introduire toutes les sources d'erreurs y compris la configuration du palpeur.

Dans la 2eme partie, nous présentons la mise au point et le mode opératoire des mesures effectuées selon la norme 10360-2. Ces résultats seront modélisés sous formes d'une matrice de corrections. Celle-ci pourra être introduite dans le logiciel de calcul de MMT pour tenir compte des corrections possibles lors de contrôle des spécifications dimensionnelles et géométriques des pièces mécaniques.

La troisième partie a été consacrée à l'étude de l'évaluation d`incertitude de mesure relative à cette matrice de correction via les deux approches analytique « GUM » et numérique Monte Carlo « MCM ». Les résultats des deux approches seront comparés et validés pour un intervalle de confiance de 95¨%.

Finalement, nous avons proposé un modèle mathématique global de correction qui a été démontré et validé par comparaison des mesures effectuées sur la machine MMT de l'ENSET à celles d'un autre laboratoire accrédité ISO 17025, par la mesure d'un entraxe sur une cale étalon.

Mots clés : Machine à mesurer tridimensionnelle, incertitude de mesure, ISO 10360-2, Méthode GUM, Simulation Monte Carlo, Comparaison inter-laboratoires, déclaration de conform

Introduction générale

Le contrôle de la géométrie et des dimensions des pièces mécaniques est une étape essentielle dans la chaîne de production. Actuellement, les formes des pièces mécaniques deviennent de plus en plus complexes ainsi que leurs tolérances de haute précision, comme celles utilisées en aéronautique, l'automobile ou en médecine, sont maintenant citées en micromètre voire en nanomètre dans certaines applications. Cette tendance exige de nouvelles méthodes et techniques de contrôles universelles, fiables et précises.

En vue de respecter les principes de GPS (Geometrical Product Specification), les machines de mesure tridimensionnelles (MMTs) sont indispensables pour la vérification des spécifications dimensionnel et géométrique des pièces mécaniques. Elles ont pour rôle principal le contrôle rapide et précis, en 3D, de la conformité des pièces mécaniques de formes complexes. Par conséquent, la conformité des MMTs et la fiabilité de leurs mesures sont primordiales pour la réussite de leur tâche au sein de la chaîne de production. Les pièces mécaniques, ainsi, contrôlées, vérifiées et certifiées par les MMTs assureront aisément et rapidement l'assemblage et le montage et compléteront leurs tâches pendant leurs cycles de vie anticipés. En revanche, en mesure de contact, une mesure sur MMT n'est exacte que si la touche du stylet est en position juste par rapport à la pièce à contrôler. Cependant, les erreurs de la tête de mesure et des cinématiques associés aux liaisons de la MMT figurent parmi les principales causes de l'inexactitude de la position du stylet par rapport à la surface contrôlée. Selon la littérature, 21 écarts géométriques, dont 18 écarts articulaires et trois écarts de perpendicularité affectent la machine à mesurer tridimensionnelle. Parmi les écarts qui présentent également un risque, on trouve ceux dues à l'effet d'échelle et à la perpendicularité entre les liaisons de la machine. Lors du contrôle d'une pièce mécanique, la position du palpeur doit souvent être changée à l'aide d'une tête orientable pour avoir accès aux surfaces concernées de la pièce. D'ailleurs, plusieurs modules de palpeur, peuvent être montés entre le palpeur et le stylet afin d'assurer le contact selon les besoins définis par le métrologue. Statiquement, quatre éléments distincts causent les erreurs : « le système d'orientation, le palpeur, le module de palpeur, et le stylet ». Le stylet est formé de l'arbre et de la touche du stylet. L'origine des non-conformités et des défaillances est due à ces systèmes qui influencent la qualité de la mesure. Dynamiquement, citons sans se limiter la vitesse d'accostage, la direction d'accostage, les erreurs de poursuite de la chaine de mesure, etc.….

Afin de garantir la crédibilité des mesures et de minimiser les incertitudes, la performance des MMTs doit être assurée, ainsi ces machines doivent suivre des étalonnages et vérifications périodiques. Les étalonnages périodiques de ces machines se font selon des normes proposées par les normes internationales. Elles ont pour objet de déterminer les erreurs systématiques et aléatoires de ces machines. La reconnaissance des principales sources d'erreurs est nécessaire pour corriger celles systématiques et améliorer celles aléatoires. Par conséquent, les fabricants et les métrologues sont invités à faire des tests pour l'étalonnage régulier et la compensation des erreurs numériquement et/ou mécaniquement.

Actuellement, le développement des techniques directes ou indirectes d'étalonnage des MMTs est devenu un thème fertile pour de multiples chercheurs. Les techniques d'étalonnage directes tentent de mesurer les sources d'erreurs individuelles sans impliquer d'autres écarts géométriques. L'interféromètre laser est l'instrument le plus utilisé pour l'étalonnage direct. Cependant, le processus d'estimation est très long, difficile à mener dans certains cas, pouvant engendrer un risque de contamination d'un type d'écart par d'autres écarts géométriques qui sont également présents dans la machine.

Pour éviter ces complexités, les chercheurs ont eu recours à des techniques d'étalonnage indirectes, en développant des modèles de mesure des erreurs sur la MMT et d'estimation de ses écarts géométriques. C'est dans cet objectif où s'articule le travail de ce mémoire et se présente en deux parties :

Dans la première partie de ce travail, nous intéresserons à la détermination des écarts de positions et d'orientations de la machine à mesurer tridimensionnelle en mesurant différentes longueurs sur des cales étalons suivant sept positions et orientations suggérées par la norme ISO 10360.2 et le modèle développé permet d'identifier les écarts géométriques caractérisant la MMT.

Dans la deuxième partie, nous essayerons d'établir une matrice de correction dont l'objectif est de corriger les valeurs mesurées avec une haute précision sans l'obligation de séparer les erreurs du palpeur des erreurs de la machine. Puis, nous calculons l'incertitude de cette matrice de correction par la méthode analytique dite le GUM puis par la méthode numérique basée sur la simulation numérique de MCM afin de valider le modèle proposé.

Après avoir réalisé des essais expérimentaux sur une MMT de type portique de modèle Mitutoyo, la méthode sera validée en appliquant des corrections aux valeurs mesurées des cales étalons et en comparant ces valeurs par rapport aux valeurs de références.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de thèse expose le détail des travaux qui ont été menés à l'École Normale Supérieur de l'Enseignement Technique de Rabat. Il est composé en quatre chapitres :

- **Le premier chapitre** est consacré à une étude bibliographique : il présente les diverses approches d'étalonnage des MMTs existantes, le système de palpage et les méthodes utilisées pour la compensation des erreurs.
- **Le deuxième chapitre** présente la vérification de la performance des MMTs suivant la norme ISO10360-2 dont la finalité est la détermination des erreurs de taille (ou de justesse) et des erreurs de palpage caractérisant la MMT.
- **Le troisième chapitre** est consacré au calcul des incertitudes de mesures sur la valeur corrigée proposée par le modèle, d'une part par la méthode analytique GUM et d'autre part par une simulation de Monte-Carlo.
- **Le quatrième chapitre** expose la partie de la correction à apporter aux mesures effectuées par la machine à mesurer tridimensionnelle jouissant des mêmes fonctionnalités (les machines portiques) dans le cas de non-conformité. Puis on va procéder à une comparaison inter-laboratoires qui nous permettra d'estimer l'exactitude de valider la méthode proposée. Celle-ci a été menée en mesurant l'entraxe d'une cale étalon et en le comparant aux résultats d'un autre laboratoire en utilisant le critère d'aptitude utilisé dans la norme ISO 17043. Le chapitre se focalise alors sur la comparaison des corrections apportées aux valeurs mesurées sur notre machine à mesurer tridimensionnelles par rapport aux valeurs mesurées dans un autre laboratoire de métrologie accrédité Cofrac selon la norme ISO 17025. La méthode de correction proposée a été testée expérimentalement et validée. Ce qui permettra d'obtenir des résultats fiables et précis pour le contrôle final effectué par le fournisseur et aussi celui effectué par le client et par conséquent, le niveau de risque sur la déclaration de conformité se voit trop réduit.

Une conclusion générale expose un bilan et un jugement sur ces travaux et proposent quelques perspectives et recommandations pour les études ultérieures.

CHAPITRE I : Etude Bibliographique

Introduction

La machine à mesurer tridimensionnelle est l'un des outils les plus rapides et les plus flexibles utilisés dans le processus de fabrication. Il s'agit de vérifier les dimensions et de vérifier la conformité des pièces mécaniques. Cependant, plusieurs sources d'erreur peuvent affecter les résultats de mesure de la MMT. Pour cette raison, de nombreux travaux de la littérature se concentrent sur la caractérisation des erreurs liées aux axes des machines-outils et des systèmes de palpage. En raison de l'interdépendance entre les différentes erreurs de la machine, la recherche dans ce domaine est toujours passionnante.

1. Les machines à mesurer tridimensionnelles

1.1. Historique des machines à mesurer tridimensionnelles

Le contrôle dimensionnel des pièces mécaniques est une activité de croissance importante dans la chaîne de production. La tolérance des pièces mécaniques, une fois citée en chiffres, est cotée en millièmes de millimètre. Cette activité nécessite la demande d'un dispositif de contrôle universel, flexible et précis, qui pourrait fournir une capacité complète pour l'intégration, dans la vision de Computer Integrated Manufacturing (CIM).

Actuellement, l'insertion de nouvelles techniques de mesure, en particulier les machines à mesurer tridimensionnelles, en métrologie dimensionnelle peut être considérée comme révolutionnaire que l'introduction de la technique numérique contrôlée (NC) dans le domaine industriel.

La machine de mesure tridimensionnelle a été introduite comme appareil de mesure manuel au début des années 1960. Elle est basée sur trois axes d'usinage sur lesquels seul le capteur remplace l'outil. Le capteur utilisé aujourd'hui est une sonde qui est en contact avec la surface de la pièce à mesurer. Les coordonnées du centre de palpeur sont affichées sur un écran et enregistrées par l'opérateur. En 1972, la première MMT qui répond à la définition d'aujourd'hui d'une Machine à mesurer tridimensionnelle est construite par le fabricant C. Zeiss en Allemagne. Après, l'évolution de la MMT a accéléré, en particulier dans le domaine du développement de nouveaux systèmes de palpage.

Le palpeur de contact a été développée à l'origine pour surmonter les lacunes des palpeurs dures et pour automatiser le processus de contact. En 1973, la précision de mesure a atteint la

référence et un système de détection de mesure tridimensionnelle a été mis en place. Aujourd'hui, les systèmes de palpage sans contact, comme les dispositifs laser ou les caméras électroniques sont présents pour agrandir le spectre de systèmes de palpage. Le processus de développement de la MMT a été et est encore fortement entraînée par l'expansion très rapide de la technologie informatique. Au stade précoce, l'opérateur a dû enregistrer et traiter les données manuellement. Aujourd'hui, l'ordinateur prend en charge ces tâches et ouvre de nouveaux horizons pour les mesures et leurs évaluations. Spécialement, des programmes sont écrits pour résoudre même les tâches complexes de mesure comme mesure des engrenages, des aubes de turbine ou de pièces de forme libre dans l'industrie automobile. Par la suite, les mesures de contrôle manuel sont commandées par ordinateur et une fois le cycle de mesure est programmé, il peut être répété pour toute une série de pièces sans aucun effort supplémentaire.

« Tech in programmation » est une méthode utilisée pour les machines à mesurer tridimensionnelles commandées par ordinateur [1], qui consiste à écrire du code dans un langage de programmation spécifique au système, puis à diriger le système de détection vers l'objet à mesurer. Cela prendra beaucoup de temps et le processus est spécifique lorsque la machine ne peut pas être utilisée pour la mesure de pièces. Afin de pallier ces insuffisances et d'intégrer l'îlot d'automatisation des MMTs dans le flux d'informations en partageant les données nécessaires avec le système informatique de conception assistée par ordinateur, différents formats d'interface sont utilisés pour échanger ces données. Le plus récent développement dans ce domaine est l'échangeur de mesure dimensionnelle à travers lequel les données CAO sont utilisées pour écrire un programme dans un format neutre qui peut ensuite être téléchargé sur la MMT des fabricants. Les MMT sont développés comme des machines de contrôle pour l'utilisation dans les salles de contrôle spéciales dans un environnement stable. Cependant, les métrologues ont demandé une MMT qui pourrait être utilisée sur le plancher du magasin, dans un environnement hostile, à côté des machines de production comme outil de mesure de haute précision pour diminuer le délai de contrôle.

Pour certaines applications, nécessitant le contrôle de la pièce à usiner dans le même poste de travail, des machines-outils sont également équipés des palpeurs. Cette technologie est surtout utilisée lorsque les spécifications des pièces à usiner sans trop serrées, nécessitant un contrôle afin d'apporter des finitions ou également pour le passage d'un posage à l'autre permettant de minimiser les dispersions de mise et remise en positions.

1.2. Structure des machines à mesurer tridimensionnelles

1.2.1. Types des machines à mesurer tridimensionnelles

Il existe de nombreuses configurations pour les machines à mesurer tridimensionnelles. Chaque configuration présente des avantages qui font des propriétés particulières pour certaines applications [2] [3]. La variété des configurations des MMT peut être classée en quatre principaux types :

- Cantilever,
- Pont (bridge type),
- Gantry,
- Bras horizontal,

Les Cantilevers types sont généralement les plus petits en taille et occupent un minimum d'espace. Cette configuration permet un espace de travail complètement dégagé, permettant un accès complet à charger, contrôler et décharger une partie qui pourrait être plus grande que la table elle-même. D'autre part, le seul support du palpeur limite la précision si une compensation spéciale n'a pas été intégrée dans le bras en porte à faux [4].

Les Ponts sont construits comme pont mobile ou des modèles de table mobile et représentent le type le plus populaire de configuration comprenant environ 90 % des ventes. Le support de ce type de MMT offre un plus grand soutien pour les grandes et moyennes machines de taille, et rend la machine très rigide pour minimiser l'incertitude de mesure. Cependant, l'accessibilité à la zone de travail est limitée par le pont ce qui ne permet pas de mesurer les pièces les plus grandes que le jeu du pont.

Le type Gantry est la plus grande MMT disponible sur le marché et est habituellement fait en fonction des besoins des clients. Sa taille pourrait être nécessaire pour mesurer des pièces comme des ailes d'avion, des carrosseries d'automobiles, des hélices de bateau ou les gros moteurs diesel. L'accessibilité à la zone de travail peut être limitée par des colonnes sur lesquelles sont montés les rails de la poutre transversale. La pièce à tester n'étant pas placée sur la machine, elle ne peut généralement pas faire la mise au point. La précision de mesure peut être classée comme moyenne.

Le Bras horizontal est le seul type de MMT où la tête du palpeur est montée sur l'axe horizontal Y au lieu d'être monté verticalement sur l'axe Z. Pour certaines applications, un accès horizontal est souhaitable pour les pièces qui sont usinées sur des centres d'usinage horizontaux. Ce type de MMT a une très bonne accessibilité à la zone de travail de tous les côtés et est sensiblement moins restreinte à une partie mesurée. La vitesse de mesure peut être élevée parce que les masses en mouvement sont plus légères. En raison de la structure de la machine, ce type de réglage CMM se traduira par une précision réduite

Figure 1 : La machine MMT installée au laboratoire de métrologie de l'ENSET

1.2.2. Constitution d'une MMT

La machine à mesurer se compose essentiellement de quatre composants principaux En fonction de la configuration de la MMT, du type de système de détection et du degré

d'automatisation, différents développements peuvent être réalisés. [5]. Les quatre composants d'une MMT sont :

- Structure de la machine ;
- Système électronique ;
- Système de palpage ;
- Système informatique et logiciels.

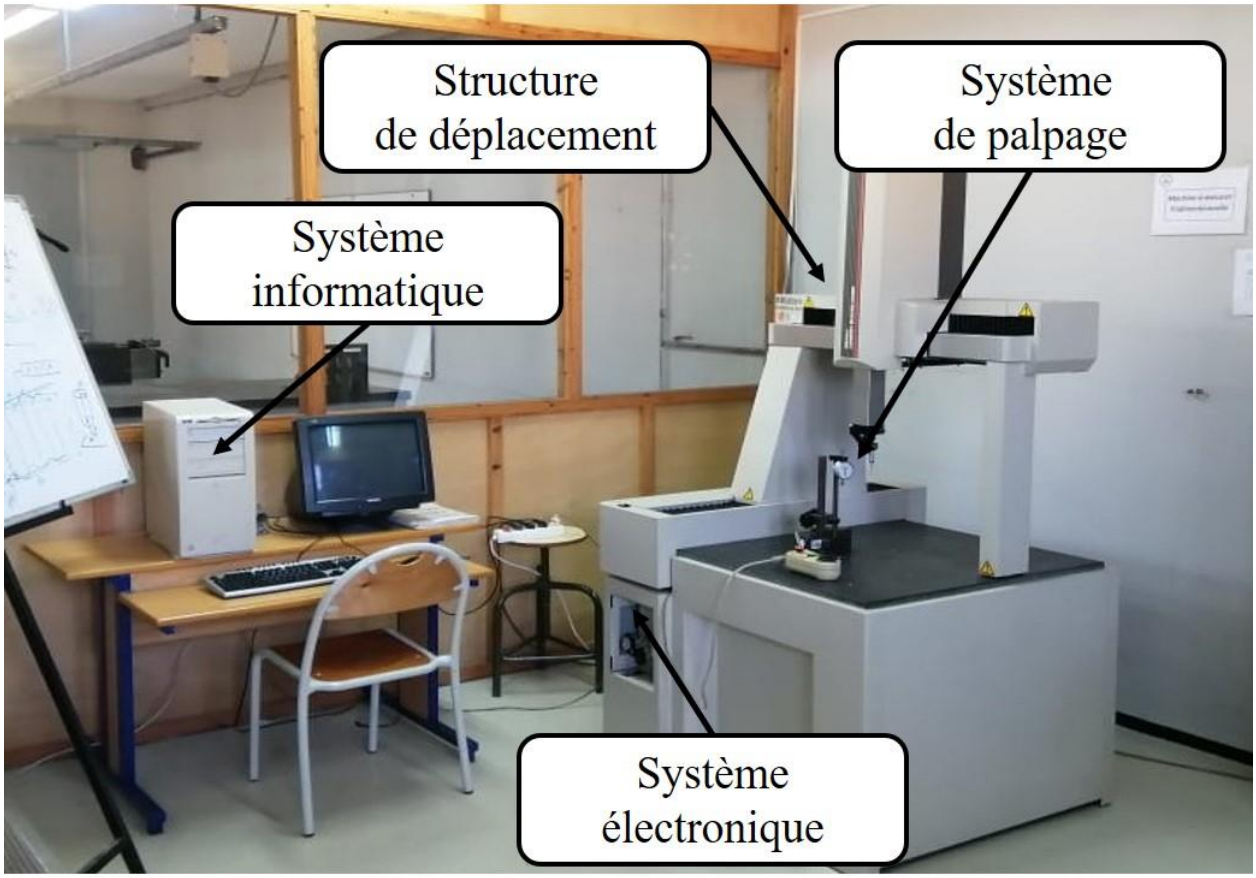


Figure 2 : Composants de la machine de mesure

Pour un acheteur, il est pratiquement impossible de sélectionner sa MMT appropriée sans évaluer soigneusement les composants du système nécessaires pour les applications actuelles et futures. Par conséquent, les composants du système disponibles sont spécifiés et les sous-systèmes les plus fréquemment utilisés sont décrits dans les sections suivantes pour donner un aperçu de la fonction de chaque sous-système.

a) Structure de la machine

La structure de la machine est composée de trois axes perpendiculaires fonctionnels. Cette structure doit remplir les conditions suivantes :

- Construction rigide pour minimiser le mouvement involontaire entre les composants de la machine ;
- Stabilité thermique pour minimiser la déformation de la machine par dilatation thermique ;
- Insensibilité aux vibrations mécaniques ;
- Bonne caractéristique d'amortissement ;
- La stabilité de la mesure à long temps.

Traditionnellement, le fer coulé et le granit sont utilisés pour construire la structure de la machine. Le Granite est adapté en raison de sa masse (densité : 3 kg/dm^3), sa caractéristique d'amortissement des vibrations, sa stabilité à long temps, sa résistance à la corrosion et sa stabilité thermique (coefficient de dilatation : $8.10^{-6}/°K$). La conductivité thermique du granite est très faible, ce qui peut conduire à des variations de température ainsi que des déformations irrégulières des moyens de guidage. Les machines avec une structure en granit sont utilisées de préférence dans un environnement contrôlé. Aujourd'hui, l'aluminium et des matériaux plus exotiques comme la céramique, ou en fibre de carbone sont utilisés comme matériaux de structure de la machine. L'aluminium est adapté en raison de son coefficient de dilatation thermique élevé par rapport à la fonte ou le granit. L'avantage de l'aluminium se trouve dans sa grande conductivité thermique. Les fabricants des MMT peuvent atteindre la stabilité thermique par l'une des deux façons, soit en choisissant un matériau qui réagit très lentement aux changements de température, comme le granit ou la céramique, ou en choisissant un matériau comme l'aluminium qui réagit très rapidement aux changements. Dans les deux cas, le matériau utilisé pour les composants de la structure doit être la même pour réduire les effets de l'expansion et la contraction due aux changements de température. Les machines-outils modernes d'aujourd'hui sont conçues pour utiliser un cadre d'analyse par éléments finis pour assurer la meilleure combinaison de légèreté et de rigidité élevée. Étant donné que les roulements utilisés sur la MMT affecteront chaque mouvement le long de son axe, cela affectera également directement la précision de la machine, de sorte que des exigences élevées sont placées sur la structure de support.

b) Capteurs de mesure linéaire

Sur les trois axes de mouvement verticaux de la machine de mesure tridimensionnelle, les capteurs de mesure linéaires sont physiquement installés pour décrire le système de coordonnées de référence ou c'est ce qu'on appelle le système de coordonnées de la machine. La fonction des capteurs de mesure est de fournir une rétroaction de position dans la plage de travail. Ils se composent d'une échelle et d'un système d'encodeur. Le principe de mesure est le suivant : un lecteur photoélectrique avec la même résolution que l'échelle glisse sans aucun contact. En fonction de l'emplacement du lecteur à l'échelle, la lumière émise par des diodes est soit bloquée ou reçue par les phototransistors. Lorsque la tête de lecture se déplace sur l'échelle, la sortie du phototransistor est une forme d'onde sinusoïdale. Cette onde sinusoïdale reçue enregistre un déplacement, mais aucune information ne peut être obtenue autour de la direction de déplacement. Cependant, un deuxième codeur photoélectrique est appliqué pour délivrer en sortie une forme d'onde sinusoïdale décalée en phase et qui est comparée à la première pour donner l'information nécessaire autour de la direction de déplacement. Les phototransistors sont généralement reliés deux à deux, afin d'annuler la tension constante ajoutée à la modulation. Les résolutions aussi faibles que des micromètres sont obtenues par un circuit électronique qui interpole les signaux analogiques. En raison du glissement sans contact de la tête de l'encodeur sur l'échelle, le jeu et l'usure ne sont pas générés, ce qui améliore considérablement sa précision de mesure. Des précautions doivent être prises lors de leur utilisation dans un environnement sale comme un plancher d'usine. Les échelles et les codeurs doivent être soigneusement protégés pour veiller à ce qu'aucune saleté ne peut déposer sur la cellule pour que la fonction appropriée ne soit pas affectée et la friction entre la tête de lecture et l'échelle n'est pas générée. L'interféromètre laser était utilisé uniquement pour certains modèles spéciaux de MMT, mais aujourd'hui, il est plus fréquemment utilisé pour les grandes MMT de type portique, et garantit un haut niveau de précision.

c) Système de palpage

L'élément capital d'une MMT est le système de palpage est. Sa fonction est d'identifier les coordonnées d'un point de mesure sur la surface de la pièce à contrôler. La variété des systèmes de palpage utilisés sur les MMT est nombreuse. Au début, quand les MMT ont été introduites, des palpeurs durs ont été appliqués. Aujourd'hui, les systèmes de palpage électromécaniques, électroniques et optiques sont exclusivement utilisés. Le type de système de palpage monté sur une MMT détermine sa capacité à l'application en fonction des caractéristiques spécifiques du système.

Les deux principaux types de systèmes de palpage sont :

- Systèmes de palpage à contact ;
- Systèmes de palpage sans contact.

Systèmes à contact : Le mécanisme du palpage est constitué d'un palpeur dynamique à déclenchement. Ce système est construit sur le principe de la liaison isostatique de Boys comme montre la figure ci-dessous. On parle de tête de palpage dynamique quand il se produit dans la tête une rupture de contact électrique qui déclenche l'ordre de lecture de la position de la sphère située à l'extrémité du palpeur (en coordonnées X, Y, Z) au moment du contact entre le palpeur et la surface palpée,

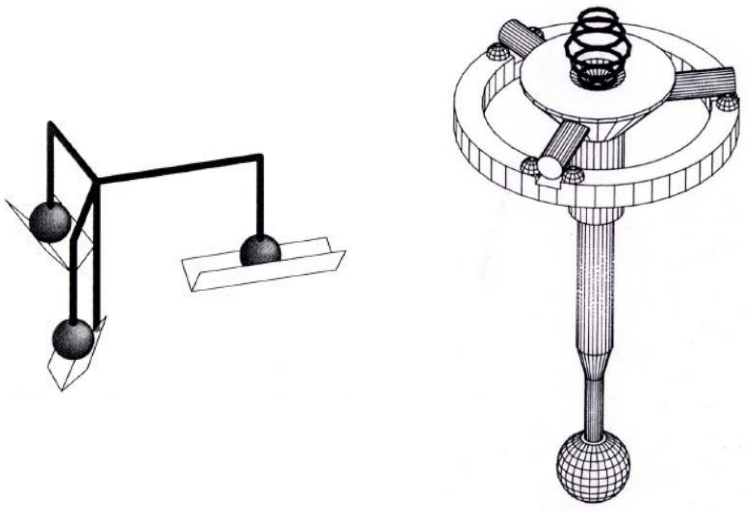


Figure 3 : Schéma de palpeur à déclenchement

Le stylet : une pointe de stylet est attachée à l'extrémité du système de palpage, qui est en contact physique avec la surface de l'objet. Habituellement, la pointe est en forme d'une sphère en rubis. Le Rubis, est une pierre précieuse, en matériau très homogène, dur et résistant à l'usure. Une sphère de haute précision peut être produite avec un écart de 0.25µm et qui prend la forme d'une sphère idéale. Lorsque le contact est établi avec la surface de l'objet, le système de palpage électronique déclenche un signal électrique… pour enregistrer la position actuelle instantanément en lisant les échelles de la MMT. Les systèmes de contact sont les plus fréquemment utilisés.

Systèmes sans contact : sont des dispositifs optiques où aucun stylet n'est utilisé pour détecter la surface de la pièce. Ces systèmes sont principalement utilisés pour la mesure en deux dimensions de pièces plates, telle que des cartes électroniques ou des objets faits d'un matériau

souple, où un système de contact peut dévier la partie à mesurer. Un autre avantage des systèmes sans contact est leur vitesse de mesure. En fonction de la mesure désirée, ils peuvent aller jusqu'à trois cents pour cent (300 %) plus rapides que les systèmes de contact. En outre, des problèmes tels que la compensation du stylet, les angles de friction ou l'évolution des forces de contact ne sont pas rencontrés par ces systèmes.

d) Système informatique et logiciels

Le système informatique et le logiciel de la MMT déterminent les capacités et la polyvalence de ces machines. Du point de vue actuel de l'évolution, cinq niveaux d'automatisation peuvent être distingués. Le marché des MMT d'aujourd'hui montre qu'il existe trois grandes catégories d'automatisation des machines qui peuvent être décrites comme suit :

- MMT avec affichage de la position de tous les axes ;
- MMT avec le traitement et la communication de données informatisées ;
- MMT contrôlé par ordinateur direct avec le traitement et la communication des données informatisées.

Le matériel informatique utilisé est polyvalent, et varie des ordinateurs personnels (PC) qui peuvent fonctionner en réseau. Ainsi, le matériel informatique nécessaire peut habituellement être acheté auprès du fabricant des MMT directement, ou si un environnement matériel approprié pour le logiciel existe déjà sur le site client, le logiciel peut être téléchargé sur le système de clients. Ainsi, les dispositifs d'entrée sont sous la forme d'un boîtier de commande qui sont fournis avec la machine. Les dispositifs de sortie sont aussi polyvalents que les périphériques d'entrée et varient d'écrans cathodiques, lecteurs de disques ou des bandes à des périphériques tels que des imprimantes ou traceurs pour documenter les résultats. En plus du logiciel de base, les utilisateurs peuvent généralement choisir en fonction de leurs besoins d'une grande variété de modules spéciaux pour résoudre des tâches complexes de mesure. Le problème du logiciel de la MMT qui fonctionne habituellement sur un UNIX ou un système d'exploitation VMS a été considérablement développé au cours des dernières années. Au stade précoce de développement des MMT, il était nécessaire de programmer les routines de mesure dans un langage de programmation standard comme FORTRAN. Aujourd'hui, la plupart des fabricants MMT offrent leur propre langage de programmation. Les systèmes de programmation sur le marché du MMT d'aujourd'hui sont faciles à utiliser et pilotés par menu, qui appliquent un jeu de commandes de style, et langue (anglais, français, …) simple qui est facile à retenir. En plus du logiciel de base de la MMT, les clients

peuvent généralement choisir en fonction de leurs besoins d'une grande variété de modules spéciaux pour résoudre des tâches complexes de mesure. Ces logiciels spéciaux offrent également des capacités d'évaluation et de documentation de pointe. L'inconvénient du fabricant de ces systèmes spécifiques est qu'ils sont pour la plupart incompatibles avec les systèmes d'autres fabricants de MMT. Cela signifie que les programmes développés sur une MMT spécifique ne peuvent pas être utilisés directement sur une autre MMT d'un autre fabricant. Cela signifie également que, lors de l'expression besoin d'achat d'une MMT, le client doit tenir compte à l'avenir des produits offerts par le fabricant de la MMT. Par conséquent, les clients d'aujourd'hui souhaitent avoir une machine et un système informatique qui utilise un système de programmation indépendant avec un langage de programmation orienté neutre. Un autre aspect de développement des formats neutres est d'intégrer le contrôle dimensionnel en partageant les données avec un système de CAO pour diminuer le temps de programmation de la MMT. En outre, l'ingénierie inverse peut-être utilisée dans l'évolution de ce domaine en mesurant les formes de pièces inconnues dont les données de la surface peuvent ensuite être traitées par un système de CAO.

1.2.3. Pourquoi choisir la mesure par MMT ?

Chaque instrument de mesure présente ses propres avantages et inconvénients. L'évaluation de la conformité d'une pièce après fabrication nécessite de bien choisir la technologie à adopter, la précision et la vitesse de mesure nécessaire ainsi que le type de mesure à effectuer. En effet, on peut utiliser un pied à coulisse pour mesurer une pièce. Cependant, l'opération peut s'avérer plus complexe vue la précision recherchée, les caractéristiques à mesurer, et le nombre de pièces à traiter. Toutefois, les machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) ont su se faire une place importante dans l'industrie et les laboratoires de métrologie par leur polyvalence. Elles sont capables de mesurer tout type de pièces, des formes du plus simples aux plus complexes, et de toutes les tailles. « Du boîtier de montre à l'Airbus », résume Bruno Lefebvre, directeur général du fabricant de machines Mitutoyo.

Les machines de mesure tridimensionnelles (MMT) doivent avoir impérativement un logiciel de programmation automatique pour simplifier la tâche des utilisateurs de machines à mesurer. Avec ce développement informatique, la définition du système de palpage, son orientation, et sa trajectoire sont automatiques et offrent une meilleure précision. Par conséquent, nous n'aurons pas besoin de définir les éléments à mesurer et les points intermédiaires ou interpréter les tolérances.

Ces machines sont plus simples et plus rapides, et ont l'avantage de réduire le temps de contrôle jusqu'à 95%, économisant ainsi le temps incroyable obtenu en utilisant un logiciel pour générer automatiquement des programmes de mesure, augmentant ainsi la productivité et réduisant le temps de mesure en optimisant le chemin de mesure. Enfin, grâce à l'application de règles de programmation définies par l'utilisateur, la qualité de la programmation et de la mesure est améliorée (répartition des points de mesure, méthode de calcul...).

Par contact, optique ou laser, la MMT peut régénérer la forme de la pièce mesurée en trois dimensions, afin d'évaluer son éligibilité en la comparant au modèle numérique. Sa précision est d'un dixième ou d'un centième de micromètre. « C'est un outil universel pour la mesure dimensionnelle, mais il ne peut pas tout faire aussi bien qu'une machine spécifique », explique Jean-Marc Pras, dirigeant de la société Eurotek, spécialisée dans la maintenance et l'étalonnage des MMT.

Ce n'est que lorsqu'un entretien approprié est assuré que la durée de vie d'une MMT peut atteindre plusieurs décennies. La fréquence de maintenance dépend de l'utilisation de la machine, mais une maintenance préventive est également nécessaire une fois par an pour assurer la fluidité du mouvement et contrôler régulièrement l'étalonnage. Parfois, l'électronique de commande peut être modifiée pour revitaliser la machine

1.3. Analyse des performances des machines à mesurer tridimensionnelles

En raison de sa complexité, comme son système de coordonnées spatiales et un grand nombre de sous-composants. Les nombreux types existants des MMT avec différents niveaux d’automatisation rendent cette fonction encore plus difficile. Les coordonnées mesurées sont combinées en éléments géométriques de telle sorte que les erreurs de mesure peuvent être résolues. Compte tenu de la complexité du fonctionnement de la machine de mesure de coordonnées, la valeur de coordonnée obtenue du point de mesure peut être déviée. Lors de la mesure d'un point quelconque de l'espace de travail, l'écart de mesure est représenté par un vecteur tridimensionnel. Cependant, les méthodes de mesure actuellement disponibles ne peuvent pas être utilisées pour déterminer le vecteur avec une précision suffisante à tous les points de l'espace. Par conséquent, l'incertitude de mesure spécifique pour différentes positions de mesure ne peut pas être obtenue pour les différentes points de mesure par la MMT.

Enfin, il faut souligner que la précision diffère d'une machine à une autre. Sur la machine de mesure tridimensionnelle, les coordonnées du point de mesure sont déterminées par le système de mesure linéaire par rapport au système de référence. L'aspect important est de savoir comment coordonner avec précision la sortie des valeurs de la position prise en contact par le système.

1.3.1. Erreur de mesure

Les machines à mesurer tridimensionnelles ont un certain degré de précision de mesure qui permet de s'approcher de la valeur réelle de la dimension mesurée. L'écart de mesure est un critère très important pour la comparaison des différents types de dispositifs de mesure, et la connaissance de sa valeur est essentielle. La valeur de l'écart de mesure avec le fabricant de l'équipement de mesure est différente de celle de l'utilisateur. Les fabricants testent ces dispositifs afin de garantir l'incertitude de mesure indiquée par eux, alors que l'utilisateur est préoccupé par la plage dans laquelle la valeur réelle de la dimension peut être attendue. Plus la tolérance de la pièce testée est étroite, plus l'incertitude de mesure sélectionnée est faible.

La capabilité d'un instrument de mesure dépend dans une large mesure de l'incertitude de mesure. Actuellement, dans l'industrie, on constate que les tolérances sont réduites en fonction des exigences d'utilisation. Ainsi, l'industrie des appareils de mesure devrait répondre à ces nouvelles exigences et les appareils de mesure devront suivre cette tendance. Cette corrélation a été connue en métrologie depuis un certain temps et est appelée « La règle d'or de la métrologie ».

1.3.2. L'incertitude de mesure

Elle se compose de deux types d'écarts différents, l'un est provoqué par des erreurs systématiques et l'autre par des erreurs aléatoires. Une distinction claire entre les causes des écarts systématiques et aléatoires est parfois difficile. Les écarts systématiques si identifiés peuvent être corrigés. Pour l'identification des écarts systématiques, une mesure comparative peut être effectuée en utilisant des méthodes de reproductibilité. Il est souvent très difficile, voire impossible, de déterminer une valeur de correction de l'écart systématique, cela ne veut pas dire que la mesure comparative ne peut pas être effectuée. Par ailleurs, les écarts aléatoires sont dus à des causes imprévisibles et non maitrisables, ils en résultent des imperfections pendant la mesure.

1.4. Les sources d'erreurs

La MMT, un dispositif de mesure hautement sophistiqué et précis, sa performance est influencée par divers facteurs qui peuvent être classés en trois grandes catégories. Les erreurs qui conduisent à un niveau inférieur de la performance sont la plupart du temps systématiques plutôt qu'aléatoires. Pour obtenir un haut niveau de performance, il est absolument essentiel pour l'utilisateur de sélectionner la machine appropriée pour ses applications spécifiques. Au-delà, la MMT doit être située dans un environnement approprié et doit être exploitée par des opérateurs bien formés et instruits.

Les quatre grandes catégories de facteurs qui influent la performance d'une MMT sont : l'environnement, la structure et la technologie de la machine, son mode de fonctionnement, ainsi que la stratégie ou la gamme de mesure.

1.4.1. L'environnement

Les facteurs environnementaux sont très critiques pour la bonne exécution d'une MMT et c'est la responsabilité de l'opérateur de fournir un environnement acceptable sur le site d'installation. Les fabricants fournissent à leurs clients des guides environnementales dans lesquelles les fabricants garantissent les performances spécifiées de la machine et ceux-ci peuvent varier d'un fabricant à un autre. Si l'utilisateur ne respecte pas les conditions d'environnement, alors il doit accepter une performance réduite de sa machine. Les facteurs environnementaux les plus critiques affectant la performance des machines à mesurer tridimensionnelles sont les suivantes :

- ✓ La température ;
- ✓ Les vibrations ;
- ✓ Les particules dans l'air ;
- ✓ L'aimantation.

La Température est le facteur le plus critique de tous les facteurs environnementaux, et son effet est souvent mal jugé. La structure de l'ensemble de la machine, en particulier l'orientation et la forme des éléments de guidage, se déforme en fonction de la température ambiante. Cette déformation, provoquée par les fluctuations de température et des gradients de température spatiale au fil du temps, est très difficile de simuler quantitativement. Ceci entraîne une perte de précision

de la MMT. Par conséquent, la température ambiante doit être comprise dans une plage de température spécifiée et la température maximale ne doit pas être dépassée.

Les vibrations mécaniques affectent l'exactitude de la MMT. Les vibrations mécaniques causées par des forces extérieures, comme des machines environnantes, chariots élévateurs, compresseurs, etc., sont transmises par la surface de support à la machine et peuvent entraîner un mouvement relatif des différents composants de cette dernière. Ce mouvement peut être sous forme de vibrations continues, discontinues, ou les deux, et ils peuvent entraîner des écarts élevés pendant la mesure. Les suspensions dans l'air sous la forme d'ondes de pression, à savoir des ondes de bruit, entraînent des écarts de mesure dimensionnelle. Les vibrations mécaniques transmises par la base ou par le plancher peuvent être évitées par la sélection d'un emplacement approprié ou en utilisant des éléments de base d'absorption de chocs. Les fabricants de MMT spécifient généralement le niveau de vibration maximal pour l'opérateur, et ils sont responsables d'effectuer l'analyse de vibration nécessaire pour obtenir toutes les informations nécessaires pour éliminer les vibrations.

Les particules dans l'air, telles que la poussière, l'huile, la graisse, affecteront la performance de la machine et conduisent à une usure accélérée de la machine et de ses sous-composants. En cas de fonctionnement dans un environnement sec et poussiéreux, les machines ayant la capacité d'auto-nettoyage peuvent fonctionner sans nuire à la performance. Sinon, la poussière et les dépôts humides affecteront les performances de la MMT à long terme. Cela peut entraîner une lecture incorrecte de la position. Bien qu'il n'y ait pas de norme officielle pour les particules dans l'air, il faut faire attention lors du choix du type approprié de la machine de mesure tridimensionnelle, et une maintenance préventive doit être effectuée régulièrement pour nettoyer les rails de guidage, les échelles et les codeurs. L'humidité réduira également les performances de la MMT en faisant gonfler la table de la machine et cette humidité peut également entraîner la corrosion des autres sous-ensembles, en particulier les composants de la machine électroniques.

1.4.2. La structure et la technologie de la machine

Plus que les facteurs environnementaux, les défauts de la machine dégradent ses performances. L'écart de la référence du système de coordonnées de la machine à partir des coordonnées idéales est un élément très important à étudier. Cet écart peut être dû à des irrégularités dans la forme et l'orientation des moyens de guidage et peut résulter du fait que les

sous-ensembles mobiles exécutent des mouvements de translation perpendiculaire à la direction de déplacement et des mouvements de rotation avec un faible angle de rotation.

Ainsi, les écarts peuvent être causés par le système de palpage et dépendent de ses caractéristiques électriques et cinétiques. Quand on utilise un système de palpage à contact, le stylet ajoute des incertitudes dans la mesure, même après un étalonnage précis, en raison de la déformation de la tige de palpage de l'élément de contact causé par la force de palpage. L'exactitude globale de la machine dépend du logiciel de la MMT. La Communauté européenne a mené plusieurs tests de logiciels dans les années 1980 pour étudier l'influence des différents logiciels sur les résultats de mesure. Cependant, les études ont été réalisées en utilisant des ensembles de données générés pour chaque élément géométrique. Les résultats de l'évaluation des éléments avec les divers logiciels ont ensuite été comparés à un logiciel de référence. Le résultat du premier test a montré qu'il y avait des écarts énormes entre les différents logiciels en utilisant les mêmes ensembles de données. Certains logiciels ont montré une erreur de calcul qui était plus grande que l'incertitude elle-même de mesure de la MMT [6].

1.4.3. Les conditions de fonctionnement

La troisième catégorie est le mode de fonctionnement de la machine. L'alimentation électrique de cette dernière est soumise à des changements de tension et de fréquence, qui peuvent influencer la performance et la reproductibilité de la machine. Cela est particulièrement vrai lorsque la machine est commandée numériquement par ordinateur. Si une MMT est équipée de coussins d'air, l'alimentation en air de la machine peut dégrader les performances et diminuer la durée de vie de la machine. Ainsi, les changements de la température de l'air d'alimentation peuvent causer des gradients thermiques dans la machine, tandis que l'humidité peut conduire à un gonflement des moyens de guidage ou à la corrosion. Pour cela, des humidificateurs sont installés pour sécher l'air avant qu'il pénètre dans les paliers à air. Pour garantir un fonctionnement correct et pour éviter des dommages permanents, l'utilisateur de la machine doit impérativement prendre les dispositions nécessaires sur le site d'installation et respecter les indications fournies par le constructeur. D'autres caractéristiques de la pièce comme la rugosité de la surface, la forme ou la dureté, peuvent influer sur la mesure et doivent être soigneusement prises en compte lors de la préparation de la mesure. Si on utilise des matériaux souples, la force d'accostage du système de palpage doit être réglable, et si le matériau est sensible et la limite du système de palpage de contact est atteinte, il faut envisager l'utilisation de systèmes de palpage sans contact. Ainsi, l'opérateur représente une source d'énergie thermique et transmet de l'énergie par rayonnement et

par un contact physique avec l'objet à mesurer ou avec les sous-ensembles de la MMT. Cette influence est particulièrement critique pour les machines où l'opérateur doit toucher les sous-assemblages pour faire fonctionner la machine. En effet, pour minimiser les influences de l'opérateur, ce dernier doit être au courant de toutes les sources possibles dégradantes de performance ainsi qu'une excellente formation. Les opérateurs devraient être testés également sur leur performance, comme la machine, sur une base régulière.

1.4.4. La stratégie ou gamme de mesure

En bref, la méthode de mesure peut avoir une grande influence sur les résultats de mesure. Il est impératif, lorsqu'on réalise une mesure, de bien choisir la meilleure stratégie, permettant de minimiser la superposition des erreurs due à la direction et vitesse de palpage, aux critères d'associations, à la construction des repères, à la projection des coordonnées des points palpés, à l'interprétations des résultats et aux approximations faites pour se rapprocher dans la mesure du possible aux norme GPS.

2. Etalonnage des machines à mesurer tridimensionnelles

L'étalonnage d'un instrument de mesure consiste à « établir une relation entre les valeurs et les incertitudes de mesure associées fournies par un étalon de référence, dans des conditions spécifiées, et les indications correspondantes avec les incertitudes associées, puis à exploiter cette information pour avoir une relation qui va permettre d'obtenir un résultat de mesure à partir d'une indication » [7].

La particularité des machines de mesure tridimensionnelle est quelle présente 21 erreurs géométriques dont 3 erreurs de positionnement 6 rectitude 9 erreurs angulaires et 3 erreurs d'orthogonalités. L'influence de ces erreurs dépend du lieu de mesure [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14].

Plusieurs projets de thèse concernaient la vérification et étalonnage des machines mesurer tridimensionnelles [6,7] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21]. Parmi les techniques utilisées pour déterminer les erreurs de mesure nous avons trouvé des lasers ou des artefacts en général les lasers sont les plus couramment utilisés pour mesurer le déplacement linaire en fait il permet de déterminer principalement l'erreur géométrique des glissières des MMTs. L'erreur de position linaire est représenté par l'erreur de justesse et l'erreur d'angle est représenté par le tangage, le

roulis, et le lacet. Cependant, les artefacts se présentent sous différentes formes divisées en trois catégories et utilisés au besoin. Les artefacts unidirectionnels tels que le calibre étagé, les lignes de bille et les cales étalons sont toujours les plus faciles mesurer [9] [22] [23] [24] [25] [26]. Il permet de déterminer les erreurs de palpage, de justesse (ou de taille) et de positions.

Afin de modéliser la machine de mesure de coordonnées, G. Zhang [27] a utilisé l'hypothèse du corps rigide en 1988. En effet, les 21 écarts qui caractérisent la machine sont déterminés par la machine mesurant le déplacement de 22 lignes dans l'espace (figure 4), et l'erreur de déplacement est mesurée par l'interféromètre laser. Ensuite, les paramètres identifiés sont traités pour compenser les erreurs de la machine. Afin de vérifier le résultat de la compensation, la grande diagonale de la machine a été mesurée. L'avantage de cette méthode de déplacement est qu'elle simplifie les réglages nécessaires à l'étalonnage de la machine, permettant à l'opérateur de déterminer rapidement l'erreur de compensation et de la modifier avec de nouvelles valeurs après un étalonnage régulier.

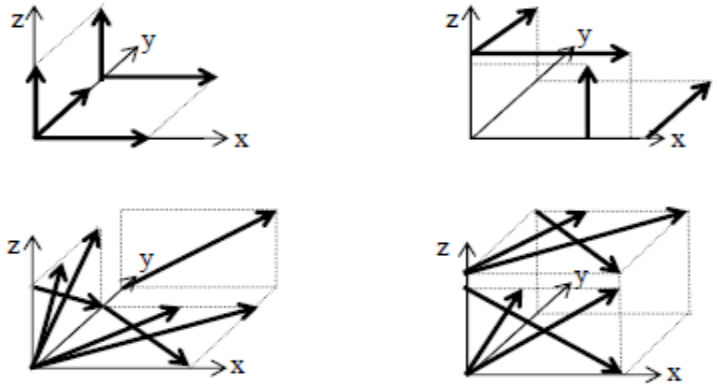


Figure 4: Les 22 lignes de déplacement pour identifier les 21 écarts géométriques de la MMT

En utilisant une ligne à billes unidirectionnel et un palpeur sans contact pour mesurer plusieurs séquences, 21 écarts géométriques peuvent être identifiés.

Pour l'erreur d'échelle, l'auteur sélectionne l'axe à vérifier, et mesure la ligne de la bille à deux positions sur la même ligne, de sorte que la deuxième position soit décalée de la première position d'une distance égale à la distance nominale entre les billes.

Pour l'écart de rectitude, l'auteur mesure les artefacts dans deux directions différentes.

Pour l'écart angulaire autour de (X) et (Y), l'auteur mesure l'artefact à deux positions parallèles à l'axe à vérifier, mais séparées par une distance le long de l'axe perpendiculaire à l'axe à vérifier.

Pour l'écart de perpendicularité, l'auteur mesure les artefacts le long des deux diagonales formées par les deux axes à vérifier.

G. Chen [28] a proposé une alternative à G. Zhang [22]. Le principe de cette méthode est de mesurer l'erreur de positionnement d'une machine-outil à trois axes dans 15 directions à travers un laser (figure 5). Au total, 21 erreurs géométriques peuvent être déterminées. Parmi ces 15 directions, la norme ANSI / ASME exige que 7 d'entre elles soient utilisées pour l'évaluation des performances des centres d'usinage CNC. Par conséquent, seules 8 mesures supplémentaires de l'erreur de positionnement sont nécessaires pour évaluer la modélisation de la machine. Les résultats des tests expérimentaux prouvent la faisabilité et l'exactitude de la méthode. L'avantage de cette méthode est qu'elle réduit le temps d'étalonnage, en particulier la machine peut être facilement reconfigurée.

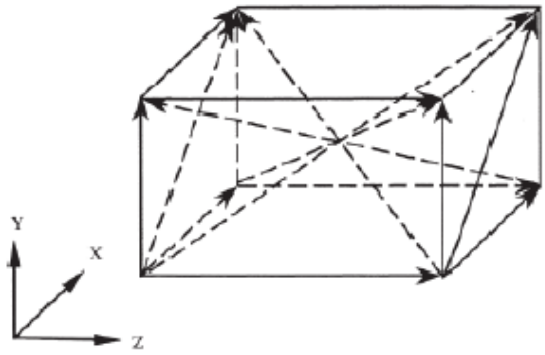


Figure 5 : Les 15 positions de mesures pour identifier les 2 écarts géométriques

Lim et Burdekin [29] recommandent l'utilisation des barres en acier perforées avec un profil en I et une longueur de 540 mm, qui ont été calibrées selon National Physical Laboratory (NPL) et ont une bonne stabilité dimensionnelle et une bonne résistance. La méthode consiste à mesurer cette barre d'acier dans 17 directions différentes (figure 6) pour déterminer 21 erreurs géométriques. Ensuite, les 21 erreurs géométriques sont converties en erreurs de volume à l'aide d'équations différentielles.

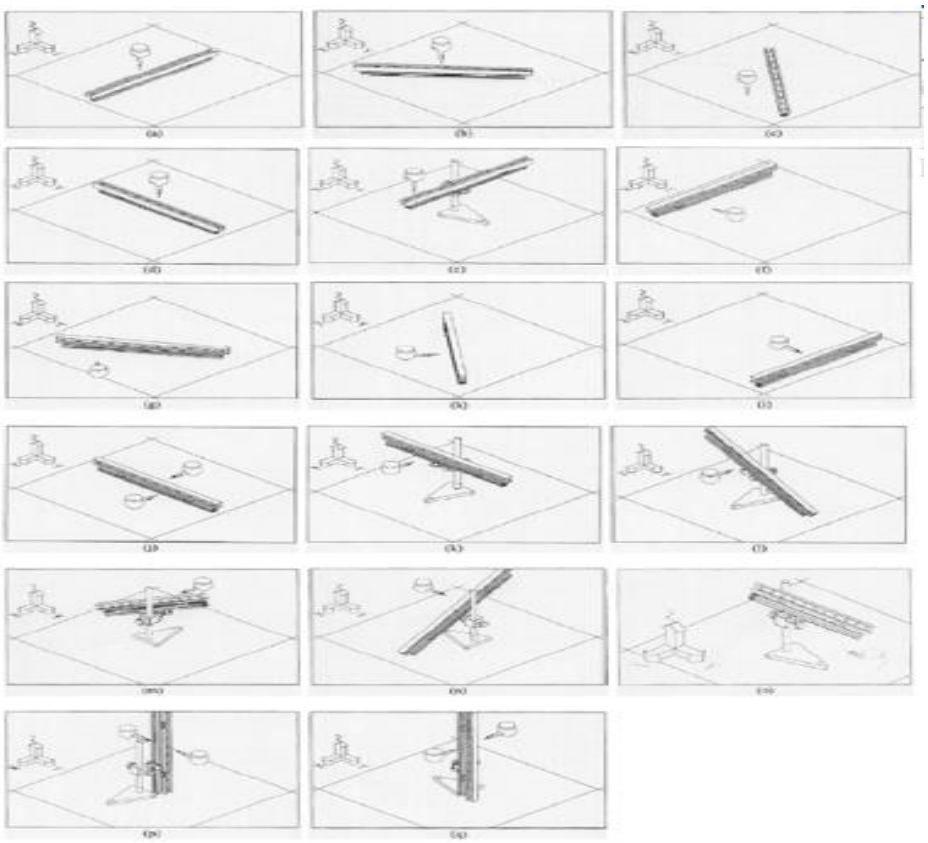


Figure 6 : Les positions de mesure pour la calibration de la MMT à l'aide d'une barre à trous.

Curran [30] a ensuite proposé une méthode rapide pour vérifier la machine de mesure tridimensionnelle. Le principe de la méthode est le suivant : la barre à billes télescopique est mesurée dans un plan, la première bille est fixe par un support magnétique et la deuxième bille tourne autour de la première en touchant 4 points à chaque position et mesurant plusieurs positions (figure 7). Cette technique permet à l'auteur de calculer l'écart de perpendicularité entre les axes dans le plan de mesure ainsi l'analyse de résidus est faite pour expliquer les erreurs de mesures causes par les écarts de perpendicularité.

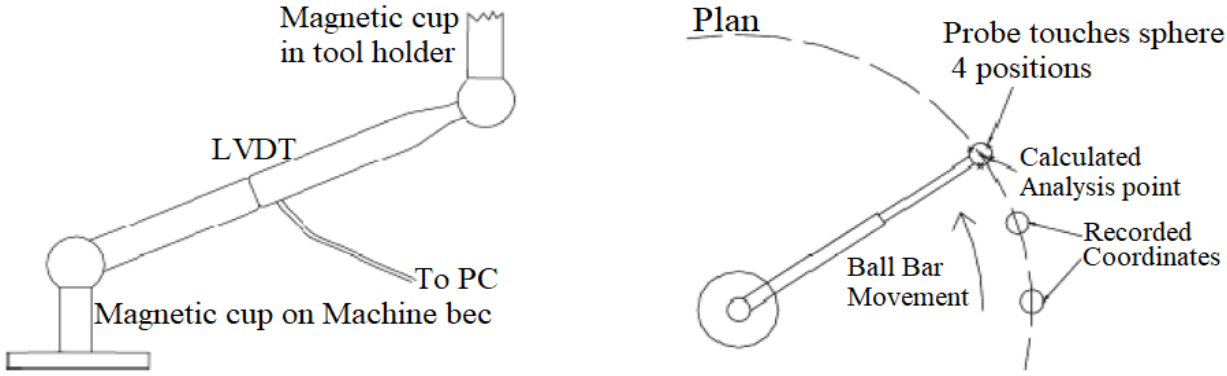


Figure 7 : Vérification de la MMT à l'aide d'une barre à billes télescopique

S.D. Phillips [31] a développé une méthode pour étalonner de grandes machines à mesurer tridimensionnelles avec des longueurs d'arbre dépassant 4 mètres. Cette méthode utilise un mouvement équipé d'un interféromètre laser (figure 8). Le rétro réflecteur est installé sur la sphère et la sphère peut être touchée en touchant le stylet de la machine. Le rétro réflecteur et la sphère concentrique idéale se déplacent le long de la jauge et la source laser est connectée à l'extrémité de la jauge. Le déplacement de la sphère le long de la jauge est égal au déplacement du rétro réflecteur mesuré par le laser. En utilisant cette méthode, nous pouvons mesurer des longueurs de plus de 4 mètres sans certitude inférieure à 10-6 μm.

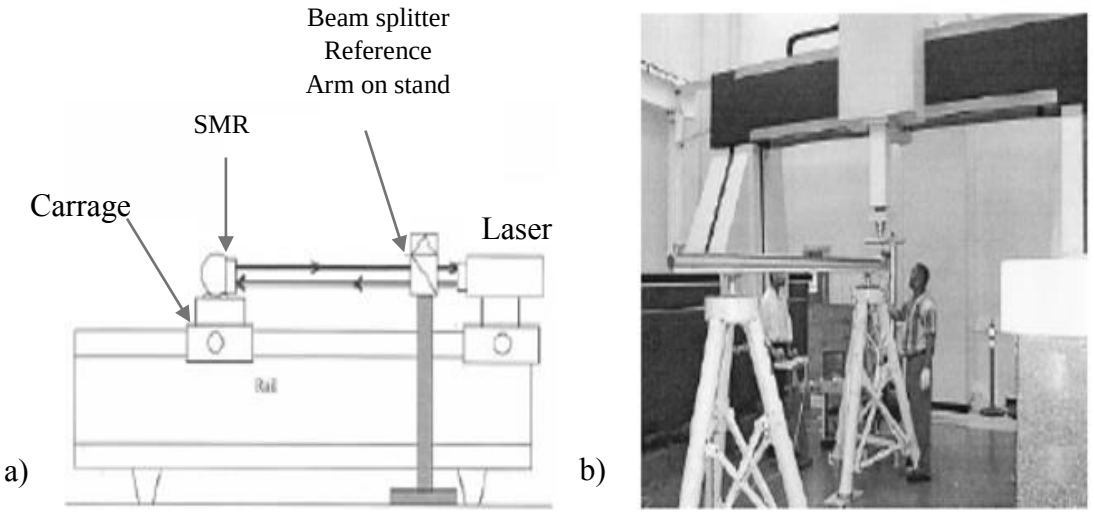


Figure 8 : Vérification des MMTs de grandes tailles

a) Schéma du montage

b) Photo du système utilisé pour un axe de 4 mètres

J.P. Kruth [32] a étudié l'écart de perpendicularité entre les axes des machines de mesure tridimensionnelles. En fait, un artefact est mesuré le long des quatre diagonales du plan de la machine. L'écart de perpendicularité est fonction de la longueur mesurée par la machine dans les quatre positions et détermine la position de mesure de la pièce en fonction des deux angles. L'avantage de cet étalonnage est que l'on peut mesurer dans quatre positions au lieu de six, réduisant ainsi le temps de mesure.

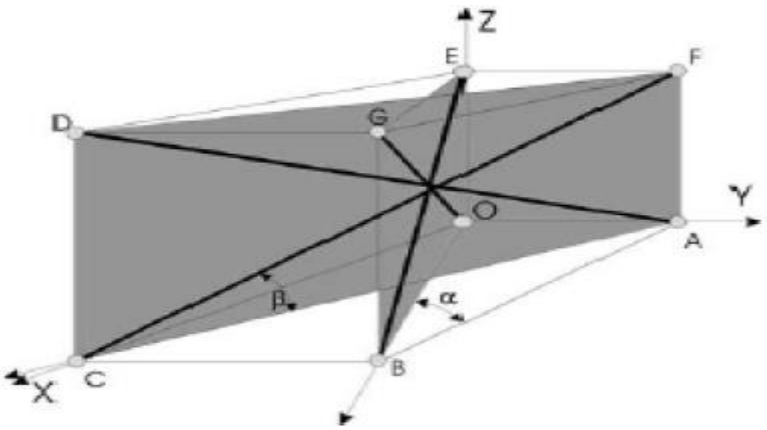


Figure 9 : Schéma représentatif de la méthode développée par J.P. Kruth

Shwenke [33] et Bosman [34] ont essayé une nouvelle méthode pour exprimer les erreurs géométriques des machines-outils grande échelle et des machines de mesure tridimensionnelles grâce au suivi des interférences. Le concept est basé sur le laser mesurant le déplacement entre deux points de référence, le 1er point est attaché à la tête du palpeur et le second on est fixé sur la base. Cette méthode répond aux exigences de précision les plus élevés. De plus, il n'y a pas de limite à la taille maximale du volume de travail mais l'inconvénient majeur est que le temps alloué à cette méthode est trop long. La méthode a également été testé sur une grande machine à bras horizontal et sur une petite machine-outil de haute précision.

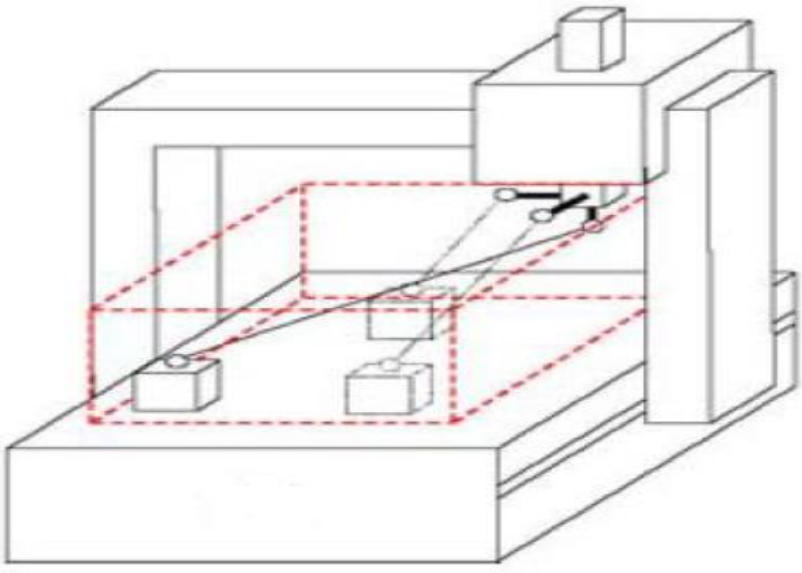


Figure 10 : Trois positions de Laser tracker dans le volume de mesure de la machine : positions de suivi

Une variété de techniques interférométriques pour compenser les erreurs géométriques de la machine a été introduite et appliqué avec succès. Toutefois, la question des coûts de l'équipement et de la main-d'œuvre demeure persistante. Cependant, Balsamo [35] et Pedone [36] visent à

réduire ces coûts tout en conservant une bonne métrologie. L'idée de base de la technique proposée est l'interférométrie des lignes indépendante, c'est ce qu'on appelle GEMIL. Contrairement aux traceurs laser qui mesurent en pointant, avec cette technique, seules des mesures interférométriques en ligne droite sont effectués sans avoir besoin d'un pointage de haute précision et d'un rétro réflecteur très isotrope.

Les simulations de cette technique ont été validées expérimentalement avec trois MMT industrielles dans des conditions hors laboratoire, par des essais standards selon la norme ISO 10360-2. Les résultats prouvent l'efficacité de la technique et confirment que la technique GEMIL est une alternative industrielle plus précise par rapport aux techniques de compensation existantes.

Afin de prendre des actions correctives sur la machine, Nafi [37] a proposé une méthode qui utilise des donnes d'essais périodiques pour identifier l'erreur de gain proportionnelle et l'erreur de perpendicularité entre les axes de la machine. Ces mesures sont basées sur les sept positions spécifies dans la norme et sont effectués sur un calibre étagé. La validation du résultat est effectuée en utilisant la méthode d'inversion et mesurant l'écart de perpendicularité par rapport à une équerre de référence.

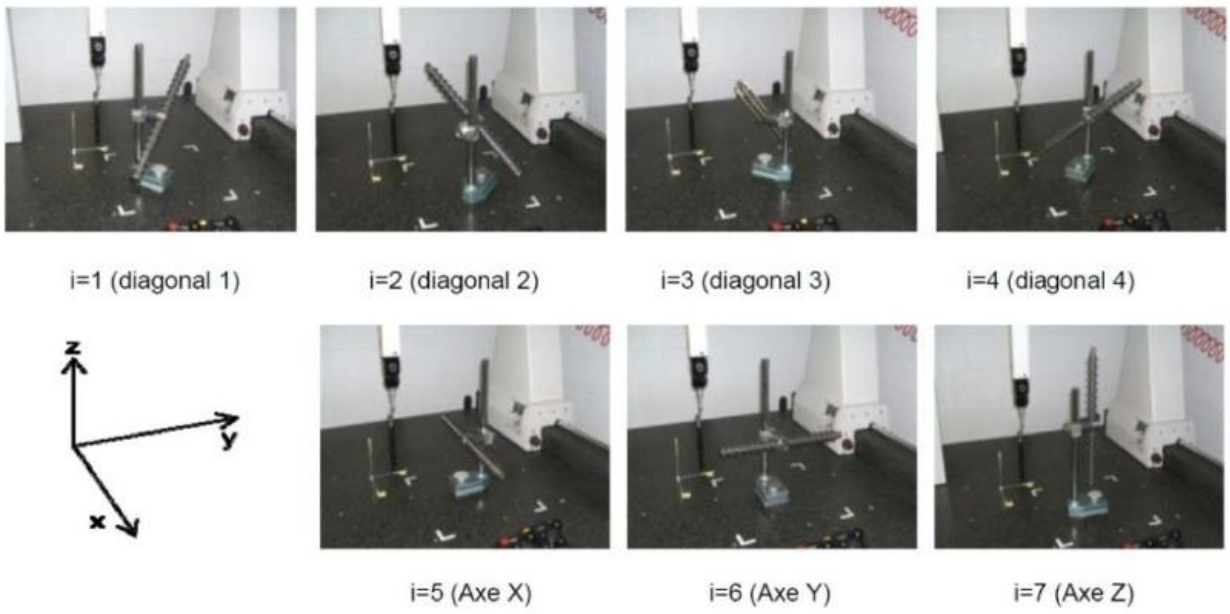


Figure 11 : Les sept positions de mesures du calibre étagé proposées par le document ASME B89.4.10360.2-2008

Ekinci et al [38] ont mis au point une classification des erreurs machine afin de créer une base conceptuelle. Les auteurs ont minutieusement analysé le mécanisme de couplage existant entre les écarts de rectitude et les écarts angulaires associés aux axes de la machine. Ils ont utilisé

des simulations et des tests expérimentaux, basés sur des principes de dépendance mathématique purement abstraits, pour étudier les limites de la modélisation des écarts linéaires et angulaire.

La méthode PTB [39] se concentre sur la mesure de la plaque perforée aux quatre positions du volume de mesure de la MMT. Selon chaque position verticale, deux mesures peuvent être effectuées sur la plaque perforée en positionnant le stylet dans le sens opposé. Une fois que les coordonnées du centre du trou de la plaque sont déterminées, les coordonnées du centre obtenues à partir de la mesure et le centre nominal spécifié pendant le processus d'étalonnage sont analysés. À partir de là, nous dérivons la direction et la longueur du vecteur d'erreur pour toutes les positions. Déterminez les 21 écarts géométriques de la machine-outil à partir de la différence entre les coordonnées mesurées et les coordonnées d'étalonnage de l'élément mesuré, un par un. De nombreux travaux décrivent l'application de cette méthode et ses effets [40] [41] [42] [43] [44] [45].

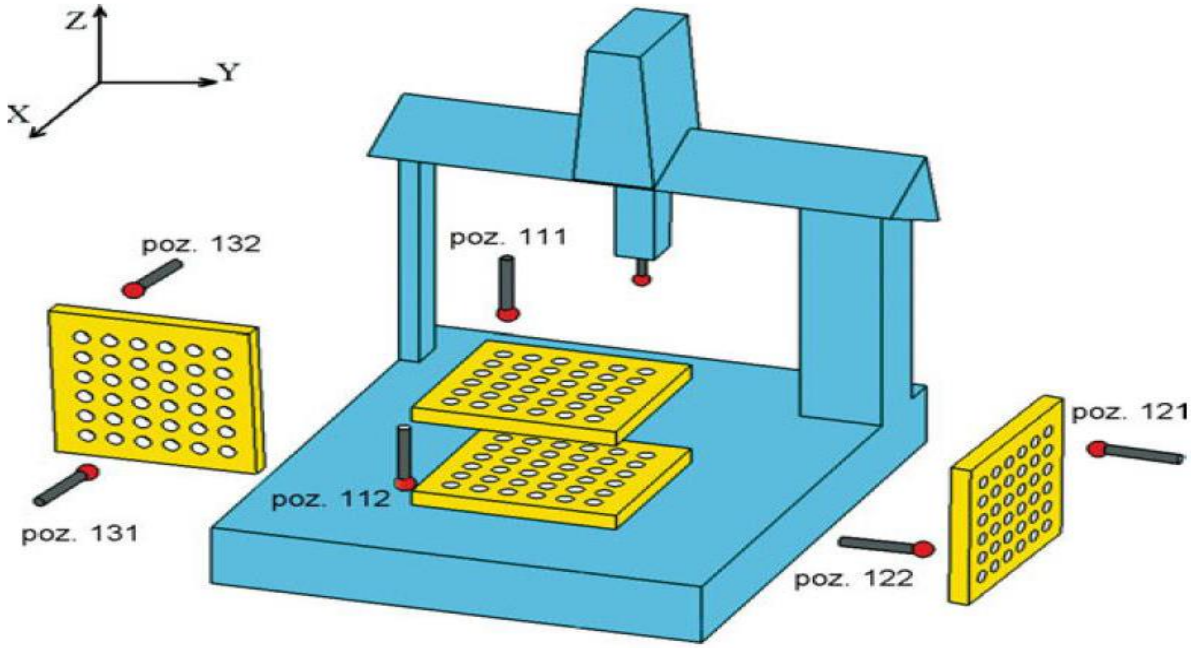


Figure 12 : Quatre positions de la plaque à trous et six mesures utilisées en appliquant la méthode PTB

L'auto-étalonnage des MMT est une technique qui permet d'identifier les erreurs machine sans être affecté par les erreurs d'artefact [46] [47] [48] [49] [50] [51] [52], ce qui contraste avec l'étalonnage classique des MMT qui repose largement sur un étalon de référence de haute précision tel qu'un interféromètre laser. Dang et al [45] ont mis au point un modèle complet d'auto-étalonnage 3D en développant l'algorithme 2D existant [53] [54]. L'algorithme proposé permet d'obtenir une cartographie 3D complète des erreurs systématiques de positionnement nécessaires

pour une analyse complète des erreurs volumétriques du MMT. Les résultats expérimentaux indiquent que l'algorithme proposé fournit des résultats d'étalonnage précis.

L. Laouina [55] a développé un modèle permettant d'identifier les écarts géométriques de la machine de topologie WFYXT. En réduisant le modèle de reconnaissance précédemment établi, les défauts de rectitude liés aux trois axes de la machine peuvent être déterminés. Pour les erreurs de machine, les erreurs de circularité et les erreurs de palpage, elles peuvent être déterminées très précisément en appliquant la méthode de séparation. La méthode proposée a été validée à l'aide de plusieurs machines virtuelles.

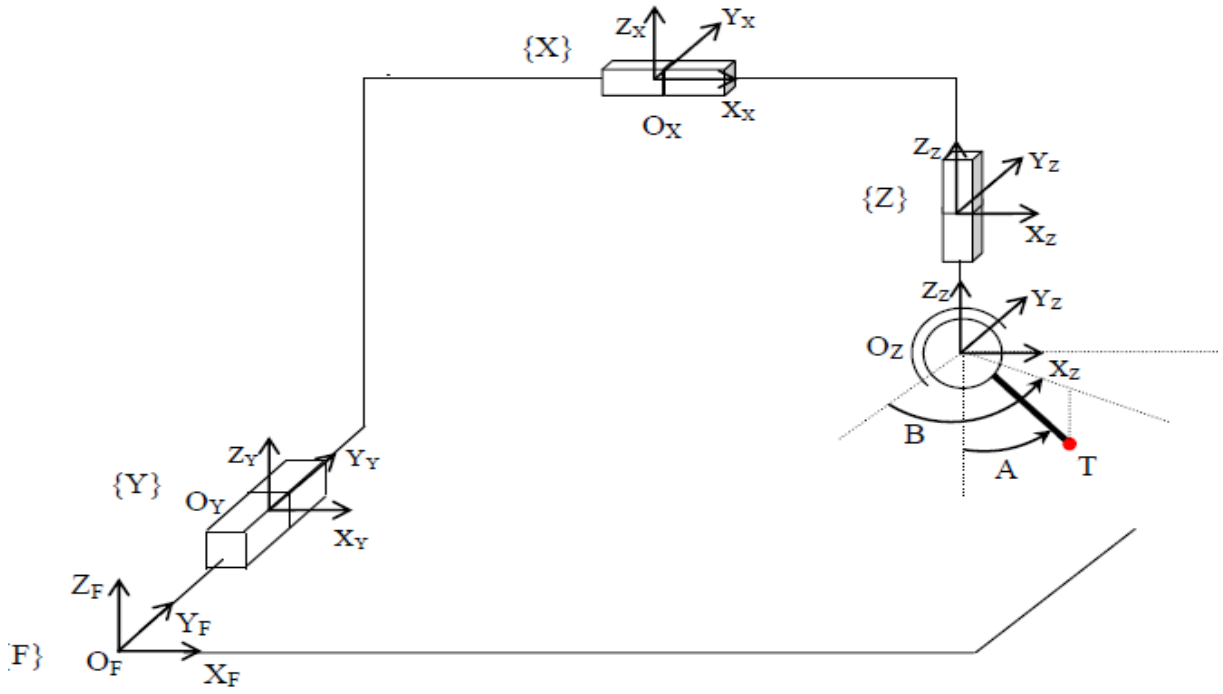


Figure 13: Le schéma cinématique spatial pour le modèle nominal de la MMT de topologie WFYXZT

Conclusion

Plusieurs études ont été faites dans le domaine d'étalonnage des machines et plus précisément l'incertitude des mesures sur les MMT. Cependant, l'étalonnage et la vérification des performances d'une MMT n'ont pas reçu beaucoup d'attention. Le problème n'est plus simple que la plupart peuvent croire, et l'industrie est actuellement connectée avec ce que signifie « tester une MMT » et comment évaluer correctement l'incertitude associée. Pour éviter ces complexités, nous avons eu recours à la technique basée sur la méthode développée dans la norme ISO 10360-2 [59]. Ceci spécifie les essais d'acceptation et la vérification périodique des performances des machines à mesurer tridimensionnelles (CMM) utilisées pour la mesure de dimensions linéaires. Les essais

d'acceptation et de vérification périodique décrits dans l'ISO 10360-2 [59] ne s'appliquent qu'aux machines à mesurer tridimensionnelles cartésiennes utilisant tout type de système de palpage de contact fonctionnant en mode de palpage discret. La norme peut obtenir des erreurs de palpage, de taille (justesse) et de répétabilité. C'est dans ce but que le travail de ce mémoire est clarifié et divisé en deux parties : Dans une première partie, nous nous intéressons à la détermination de la matrice de correction d'étalonnage de la machine de mesure tridimensionnelles en se basant sur les résultats de la norme 10360-2. Dans la deuxième partie, nous nous concentrons sur le calcul de l'incertitude liée à la matrice de correction en utilisant la méthode GUM, puis sur la vérification du modèle GUM par la méthode de Monte Carlo.

CHAPITRE II : Vérification de la MMT selon la norme ISO 10360-2

Introduction

La norme internationale iso 10360 [56] définit une machine de mesure tridimensionnelle comme un instrument de mesure doté d'un système de palpage et pouvant avoir 3 coordonnes (x, y et z) sur la surface de la pièce. Au fil des ans, des normes ont été élaborées pour harmoniser les spécifications de la performance des MMT afin de permettre aux clients, lors de l'achat, de choisir la machine la plus exacte en termes des spécifications à contrôler et des performances spécifiées.

La série des normes ISO 10360 détaille l'acceptation, les essais de vérification et de contrôles provisoires nécessaires pour déterminer si la MMT est conforme aux erreurs maximales tolérées du fabricant. Elle définit la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) en tant qu'un système de mesure équipé d'un système de palpage et/ou scan capable de déterminer les 3 coordonnées (x, y et z) sur la surface de la pièce.

Cependant, en raison de l'incertitude associée à la MMT, il arrive que la déclaration sur la conformité de mesure de la machine ne puisse pas être satisfaite si ce paramètre n'est pas pris en compte. La décision basée sur les données de mesure peut être anormale. A. Jalid dans [57] a proposé une méthode basée sur l'hypothèse classique des petits déplacements pour estimer l'incertitude des éléments géométriques associés. Sa méthode est basée sur la régression de la distance orthogonale. Elle peut donc être mesurée dans le repère machine et l'incertitude des coordonnées du point de mesure est prise en compte après avoir modélisé les surfaces géométriques les plus courantes en métrologie tridimensionnelle. Une méthode d'évaluation basée sur la régression orthogonale de distance (ODR) est proposée pour déterminer les paramètres et les incertitudes associées des éléments géométriques associé. Ensuite, la modélisation a été vérifiée selon la norme iso 10360-6 et la modélisation a été complétée par les activités de test de mesure réalisées sur la machine de mesure 3d. L'évaluation de l'incertitude de mesure liée aux défauts de forme est déterminée en appliquant la loi de propagation de l'incertitude et vérifié par la méthode de Monté Carlo. Pour les spécifications de parallélisme et de perpendicularité, des estimations de l'incertitude causée par la plage de mesure lors de l'inspection des pièces mécaniques sont données.

La norme internationale ISO 10360 couvre l'essai de réception et de vérification des MMT. Cette norme a actuellement plusieurs parties [58] [59] [60] [61] [62] [63] [64] [65] [66]

Ainsi, la partie 11 de la norme [67] est en cours d'élaboration.

Veuillez noter que la norme iso est auditée tous les cinq ans.

Dans ce projet de thèse, nous nous concentrons sur la deuxième partie de cette norme 10360-2 [59]. « MMT pour la mesure de dimension linaire ».

1. La norme ISO 10360

1.1. Les sources d'erreur de la MMT

Dans le chapitre précèdent, nous avons discuté des erreurs qui influencent sur la performance de la mesure tridimensionnelle [68]. Or, la norme ISO 10360 a classé ces erreurs comme des erreurs de position ou des erreurs de calcul. Nous vous rappelons que l'erreur de position est l'erreur cumulée lors de la mesure de points sur la surface de la pièce à contrôler.

Elles sont dues à :

- La précision des éléments constituants la MMT — les voies de guidage, les échelles, le système de palpage et la sphère de qualification ;
- L'environnement dans lequel opère la MMT — la température ambiante, les variations de température, d'humidité et de vibrations ;
- La stratégie de palpage utilisée — l'amplitude et la direction de la force du palpeur, du type de stylet du palpeur utilisé et de la vitesse de mesure ;
- Et les caractéristiques de la pièce à mesurer— élasticité, la rugosité de la surface, la dureté et la masse du composant.

Concernant les erreurs de calcul. Ils sont déterminés par un logiciel permettant d'estimer la géométrie de la pièce à mesurer, la précision de l'ordinateur utilisé dans la MMT, la position et le nombre relatif de points mesurés.

Généralement, on utilise l'interféromètre laser pour mesurer directement l'erreur géométrique du CMM, ou l'étalon Laser TRACER pour mesurer l'erreur géométrique du CMM indirectement. Une fois mesurées, ces erreurs peuvent être utilisées pour corriger les erreurs de la machine.

1.1.1. Les erreurs géométriques de la MMT

Une MMT a vingt et une sources d'erreur cinématique [69] [70] [71] [72] [73] [74] [75] [76] [77] [78] [79]. Les erreurs cinématiques sont des erreurs dues à la composition de la machine en raison de la fabrication imparfaite ou de l'alignement de ses axes lors de l'assemblage. Le mouvement linéaire de l'élément mobile comporte toujours six éléments qui s'écartent de la trajectoire nominale

a. Une déviation de position, dans la direction du mouvement (linéarité) ;
b. Deux déviations linéaires orthogonales à la direction de mouvement (rectitude) ;
c. Trois écarts angulaires (rotations du corps rigide - roulis, tangage et lacet).

En outre, il y a les trois erreurs de perpendicularité entre les axes.

1.1.2. Erreur ou incertitude

L'erreur et l'incertitude sont deux termes nettement différents et sont indispensables dans le milieu métrologique.

- L'incertitude est une évaluation du doute associée au résultat de mesure pour caractériser la propagation des valeurs qui lui sont associées ;
- L'erreur est la différence entre la valeur mesurée et la valeur réelle de l'objet mesuré.

Lorsque l'erreur est évaluée en connaissant à l'avance la valeur vraie de l'élément à mesurer, une correction peut être appliquée. Par contre, Toute erreur dont la valeur n'est pas connue est alors une source d'incertitude.

La classification des erreurs dépend généralement de la manière dont l'erreur affecte le résultat de la mesure. On distingue deux types d'erreurs :

- L'erreur aléatoire, qui est une erreur non corrélée et qui affecte les résultats de mesures répétées ;
- L'erreur systématique est une sorte d'erreur, qui ne dépend pas du nombre de mesures effectuées, mais est attribuée à l'ignorance du processus de mesure.

Il est à noter que lorsque les erreurs aléatoires sont faibles, les erreurs systématiques peuvent être identifiées.

1.1.3. L'incertitude de mesure

Le Vocabulaire international de métrologie du BIPM " (VIM) édition 2012 " [80] définit l'incertitude comme un paramètre non négatif qui précise la dispersion des mesures en fonction des données utilisées. En général, toutes les mesures sont soumises à des erreurs et à des incertitudes. Un résultat de mesure n'est jamais vrai ou fini. Il est donc possible de fixer des limites pour lesquelles on peut être sûr que le résultat de mesure se situe dans cette plage.

1.1.3.1. Les types d'incertitudes de mesure

Le résultat d'un mesurage dépend d'un ensemble de grandeurs qui pourront varier d'une manière aléatoire. L'incertitude type sur chacun de ces variables peut être évaluée par des moyens statistiques, puisqu'en pratique, c'est rarement possible d'évaluer ces incertitudes. Les composantes d'incertitude engendrées sur chacune des grandeurs d'entrée influent sur le résultat mesuré. Cependant, une évaluation de ces grandeurs s'impose afin de voir le comportement global du résultat de mesure. L'influence de chaque facteur sur les résultats de mesure peut être étudiée.

Les méthodes d'évaluation des incertitudes sont divisées en deux : de type **A** et de type **B** :

- L'évaluation de type A est basée sur l'application de méthodes statistiques à une série de mesures répétées. Il est souvent utilisé pour évaluer l'incertitude de la répétabilité des mesures effectuées. Lorsque le processus de mesure est répété en maintenant (au plus) les mêmes conditions de travail, on observe généralement une dispersion des valeurs mesurées.
- L'évaluation de l'incertitude de classe B est basée sur l'analyse scientifique de toutes les informations disponibles avec les résultats de mesure antérieurs, y compris les connaissances générales des matériaux et instruments précédemment utilisés, l'expérience des métrologues et le fabricant des données spécifié dans le certificat d'étalonnage. Elle est estimée par des lois à priori, expériences passées, données d'étalonnage, spécifications du fabricant, etc.

L'évaluation de l'incertitude types B d'une grandeur Xi nécessite une bonne connaissance du processus de mesurage, du matériel utilisé et de la densité de probabilité associée à l'incertitude

cherchée. Elle concerne les grandeurs qui n'ont pas été obtenues à partir d'une série d'observations répétées, et son utilisation se base sur l'expérience de l'opérateur. L'incertitude type donnée est évalué alors par une analyse scientifique basée sur la variation du paramètre X_i. Par conséquent, l'évaluation de type B doit garantir que la plage d'erreur est similaire à celle obtenue par l'évaluation de type A. L'incertitude type B est basée sur la dispersion des mesures attendues et la probabilité supposée de distribution. La dispersion est la composante d'incertitude semi-autonome estimée associée à l'entrée, telle que définie dans le tableau ci-dessous. La distribution de probabilité peut prendre une variété de formes qui est généralement acceptable pour assigner des formes géométriques bien définies (par exemple, rectangulaire, gaussien, triangulaire, asymétrique).

Lois de probabiltés usuelles

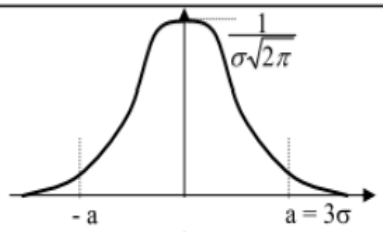
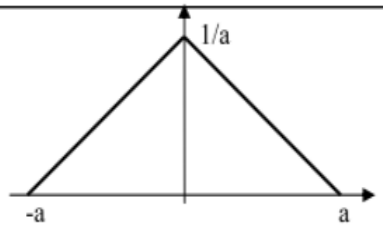
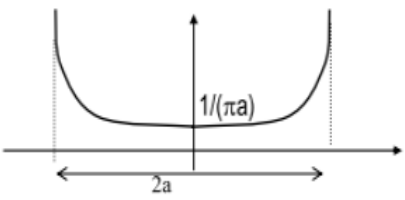
loi	Fonction de distribution	u(x)	utilisation
normale		$a/3$	Erreur dépendant d'un nombre important de paramètre, de faible effet individuel.
triangulaire		$a/\sqrt{6}$	Erreur comprise entre deux limites avec faible probabilité d' atteindre ces limites
uniforme		$a/\sqrt{3}$	Résolution d'un indicateur numérique - Hystérésis Instrument vérifié conforme à une classe
dérivée arc sinus		$a/\sqrt{2}$	Grandeur d'influence variant de façon sensiblement sinusoï-dale entre deux extremums (ex : température régulée)

Tableau 1 : Tableau des incertitudes des lois de probabilités usuelles

1.1.3.2. Analyse du processus de mesure sur les MMTs

Cette étape analytique du processus de mesure est cruciale. En effet, toute évaluation de l'incertitude nécessite un examen très approfondi du nombre de mesures et du mode de fonctionnement utilisé. Nous commençons tout d'abord par la définition de toutes les grandeurs d'influence. Nous utilisons un moyen, très adapté pour analyser toutes les sources d'erreurs et les corriger lorsque c'est possible, dit diagramme causes-effets. Cet outil est développé par Karou Ishikawa en 1962 et se présente autour du concept des 5 M qui permet de regarder en effet l'objectif sous cinq causes différentes divisées comme suit :

- Matière : représente la machine MMT
    - La géométrie de la machine ;
    - La justesse des règles ;
    - Le comportement dynamique de la machine ;
    - Les modifications de la structure sous l'effet des charges ;
    - Le système de palpage en particulier les différentes configurations des palpeurs ;
    - Le logiciel de calcul.
- Moyens : représente les étalons (cales et sphère)
    - La qualité géométrique ;
    - La stabilité dans le temps ;
    - Le comportement à la température de mesure ;
    - La déformation sous l'effet de certaines contraintes.
- Méthode : le mode opératoire d'étalonnage en respectant les normes en vigueur
    - Le nombre et la position des points relevés ;
    - La gamme de mesure ;
    - La direction d'accostage ;
    - La vitesse d'accostage.
- Main-d'œuvre : l'opérateur ou l'utilisateur
    - Expérience de l'opérateur ;
    - Formation de l'opérateur ;
    - Habilité de mesure.
- Milieu : l'environnement de travail de travail de la machine
    - L'effet de la température sur la géométrie et sur la justesse des règles ;
    - La dilatation des produits que l'on est censé mesurer à 20°C ;
    - Les vibrations.

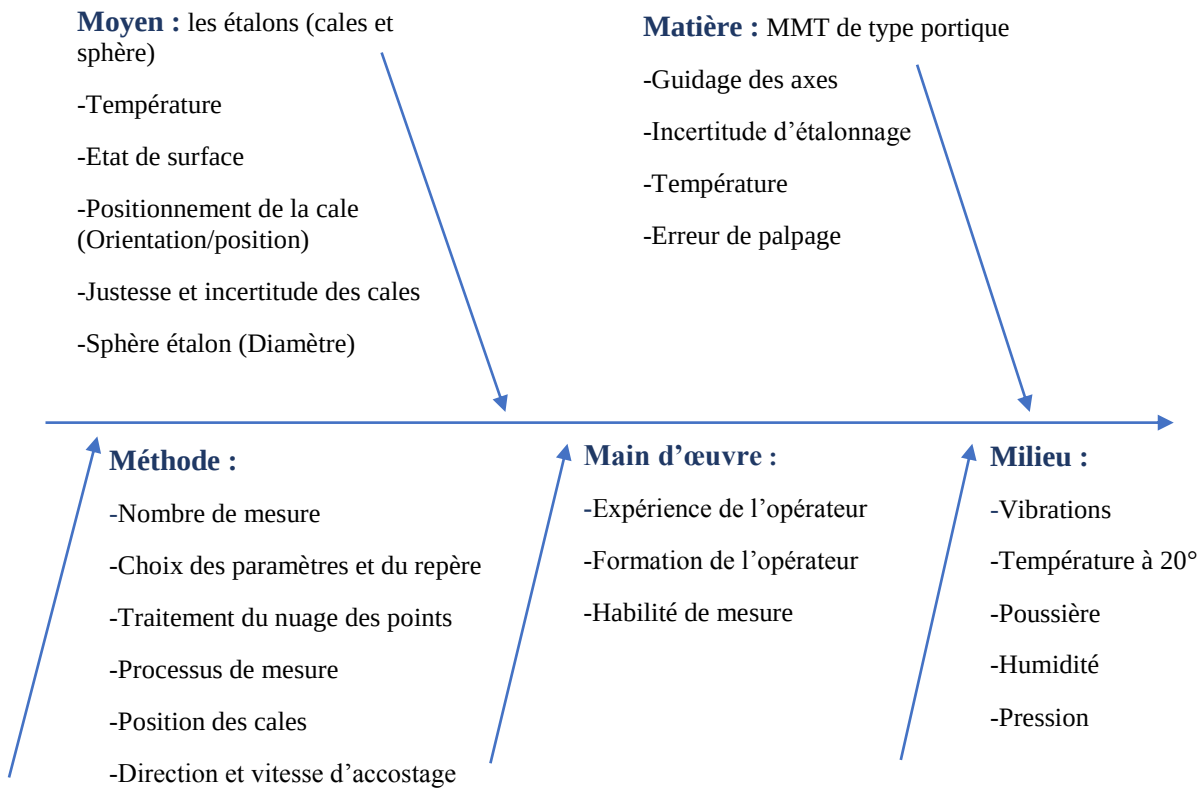


Figure 14 : Schéma de la méthode des 5 M

1.1.4. L'ISO 10360 et les erreurs géométriques de la MMT

L'étalonnage et la vérification des performances des machines de mesure tridimensionnelles sont basés sur l'échantillonnage de la capacité de l'instrument à mesurer la longueur pour déterminer si ses performances se situent dans la plage d'erreur maximale autorisée de la mesure de longueur du fabricant (voir l'erreur maximale autorisée indiquée par le CMM pour mesurer l'erreur dimensionnelle). Les tests ne permettent qu'une déclaration sur la capacité globale de mesure de longueur de la MMT. Cette limitation est due à la façon complexe dont les erreurs se combinent au sein d'une MMT. Par conséquent, l'incertitude de mesure de longueur échantillonnée ne peut pas être considérée comme représentative de toutes les fonctions de mesure possibles que la MMT est capable d'effectuer.

Trois termes qui sont souvent irremplaçables quand on parle de la MMT. Ces termes sont : qualification, vérification et étalonnage. Les opérateurs des MMT parlent souvent par erreur sur le calibrage du palpeur ou la MMT calibrée à la norme ISO 10360 [57]. Pour éviter cette confusion, les termes corrects sont énumérés ci-dessous :

- **Qualification du système de palpage :** Une tâche effectuée au jour le jour pour déterminer le rayon réel de la pointe du stylet ;
- **Vérification MMT** — Une tâche effectuée à intervalles réguliers (souvent par an) afin de déterminer si la MMT répond toujours aux spécifications du fabricant ;
- **Étalonnage MMT** — Une tâche effectuée sur l'installation pour déterminer toutes les vingt et une source d'erreur cinématique. Souvent appelé la cartographie d'erreur d'une MMT.

1.1.5. Les tests d'acceptation de la norme ISO 10360-2

Le test d'acceptation devrait normalement être effectuée lors de l'installation initiale de la MMT, ou bien si cette dernière a été révisée ou mise à niveau.

Avant et pendant le test, la MMT doit être utilisée conformément à la procédure indiquée dans le manuel d'instructions. Il s'agit du démarrage de la machine, la qualification du palpeur et sa configuration.

Si le but du test est de vérifier que la machine répond à ses spécifications, les conditions spécifiées par le fabricant devraient être utilisées à savoir la longueur et le type du stylet, la sphère de référence, la vitesse de palpage, etc. Les conditions environnementales recommandées par le fabricant doivent être respectées.

Il convient de rappeler que lors de la vérification de la mesure de longueur, le système de palpage doit être identifié à l'aide de la sphère de référence fournie par le fabricant (ou un autre artefact fourni par le fabricant de qualification de palpage). À noter que les résultats du test ISO 10360 ne sont valables que pour les mesures effectuées avec la même sphère de référence. Si la sphère de référence est endommagée, il doit être remplacé par un matériau similaire et le test ISO 10360 devrait alors être répété.

Pour les systèmes de palpage avec de petites pointes de stylet, une sphère de référence alternative peut être nécessaire pour qualifier la pointe du stylet, mais il faut se rappeler que les résultats du test ISO 10360 ne sont pas applicables dans ce cas.

1.1.5.1. Test d'acceptation sur l'erreur de palpage selon la norme ISO 10360-2

Avant d'effectuer le test, il est recommandé qu'un seul stylet soit utilisé. La norme ISO 10360-2 suggère également de comparer le rayon trouvé avec la taille calibrée pour donner l'erreur de taille unique du stylet P_{STU}. La valeur obtenue pour P_{STU} devrait être suffisamment faible par rapport à $E_{0,\,MPE}$ et $E_{L,\,MPE}$.

La première étape consiste à utiliser les procédures du fabricant pour identifier le système de palpage afin de s'assurer que toutes les poussières, rouille ou empreintes digitales sont éliminées de la boule de référence et de la pointe du stylet, puis utiliser le test sur le système de palpage pour déterminer si la MMT peut mesurer dans la plage des valeurs Spécifiés par le fabricant PFTU et MPF Lorsque nous mesurons la sphère de référence en déterminant la plage de valeurs de la distance radiale (r). Il est conseillé d'effectuer ce test avant le test d'acceptation sur l'erreur de taille ou de re-vérification.

a) Erreur de palpage

L'erreur de palpage est une constante positive, de valeur définie par le fabricant de la MMT. Il est appliqué à tout endroit de la sphère de test dans l'enveloppe de travail et pour toute direction de palpage. Dans cette partie, nous nous concentrerons sur la méthode de détermination de l'erreur de palpage basée sur l'ISO 10360-2. Selon cette norme, le diamètre de la boule d'essai doit être compris entre 10 mm et 50 mm. La boule d'essai doit être étalonnée. Ainsi, le défaut de sphéricité doit être prise en compte lorsque les règles de détermination de la déclaration de conformité selon la norme sont utilisées pour prouver la conformité ou la non-conformité à la spécification. La sphère d'essai doit être montée de façon rigide pour surmonter les erreurs dues à la flexion de la tige de montage. Les sphères de diamètres 30 mm sont couramment utilisées. Une petite sphère est avantageuse, car il y a moins de probabilités d'erreurs de la machine contribuant à l'erreur de palpage. La norme recommande que l'erreur de forme de la boule d'essai ne dépasse pas 20% de l'erreur de palpage du fabricant.

L'utilisateur peut aussi choisir la configuration du stylet, mais cela doit être dans les limites spécifiées par le fabricant. C'est à dire, la longueur du stylet doit être choisie parmi l'une des longueurs définies dans la norme.

L'ISO 10360-2 : 1995, et 2001 ont recommandé que l'orientation du stylet ne doive pas être parallèle à l'un des axes de la MMT. Cependant, ISO 10360-5 indique maintenant que l'orientation du stylet doit être parallèle à l'axe vertical de la MMT, sauf indication contraire.

Il est nécessaire de qualifier le système de palpage selon les procédures du fabricant en veillant à ce que les particules de poussière, de la rouille ou des traces de doigts soient retirées de la sphère de référence et de la pointe du stylet.

L'étape suivante consiste à monter la sphère de test sur la machine en enlevant les particules de la poussière et les traces de doigts. La norme exige de monter la sphère d'une façon rigide pour minimiser l'effet de flambage. Ainsi, pour minimiser l'effet d'orientation, le stylet a été positionné parallèle à l'axe Z.

Nous mesurons ensuite la surface sphérique formée par la boule d'étalonnage d'un diamètre de 30 mm. La sphère a été fermement positionnée sur le marbre et la direction d'accostage est perpendiculaire à la surface de la sphère à chaque point de palpage

Nous avons prélevé 25points sur cette sphère. Ils sont situés entre l'équateur et les pôles de la sphère de test, et sont uniformément répartis longitudinalement sur l'hémisphère. Il est nécessaire que les points soient à peu près également répartis sur au moins une demi-sphère de la sphère de test. Le motif suivant est recommandé pour le palpage (voir figure ci-dessous) :

- Un point sur le pôle (défini par la direction de l'arbre de stylet) de la sphère d'essai ;
- Quatre points également espacés (22,5°) en dessous du pôle ;
- Huit points également espacés à 45° en dessous de la perche et mis en rotation à 22,5° par rapport au groupe précédent ;
- Quatre points également espacés (67,5°) en dessous de la perche et mis en rotation à 22,5° par rapport au groupe précédent ;
- Les huit points sont également espacés de 90 ° au-dessous du pôle (c'est-à-dire sur l'équateur) et tournés de 22,5 ° par rapport au groupe précédent.

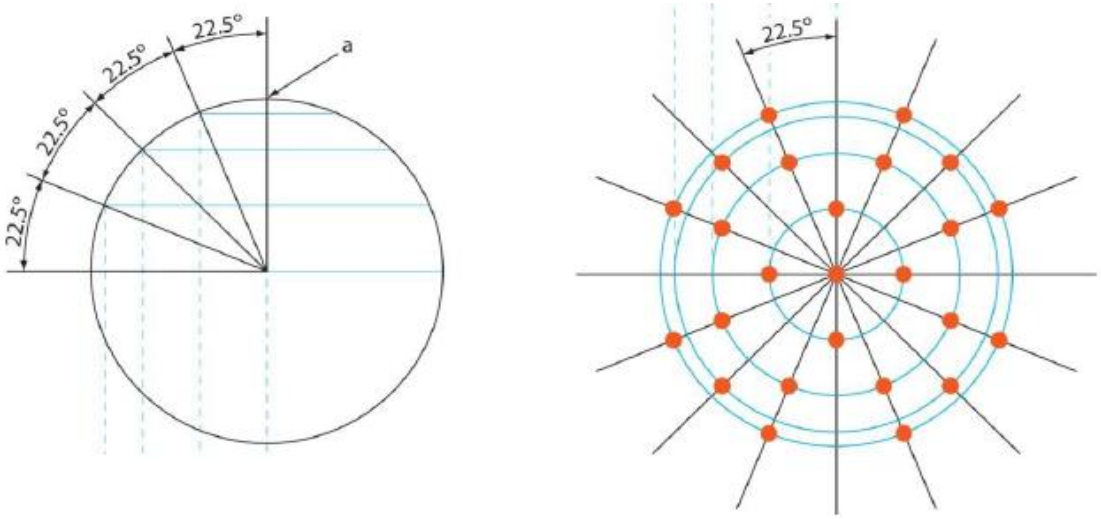


Figure 15 : Les 25 points palpés sur la sphère selon la norme 10360-2

La mesure des 25 points manuellement peut être difficile à réaliser. Cependant, nous suggérons de calculer les positions nominales des vingt-cinq points sur l'hémisphère (coordonnées x, y, z et les angles entre les axes) avant l'essai et nous visons alors à palper ces points. Selon les données de la sphère gaussienne, la distance radiale ρ est calculée pour chacune des 25 valeurs mesurées. Cette distance est la distance entre le centre calculé de la sphère (x_0, y_0, z_0) et le point palpé (x_i, yi, z_i). Sa formule de calcul est :

$$\rho i = \sqrt{(xi - x0\ )\text{^}2 + (yi - y0\ )\text{^}2 + (zi - z0\ )\text{^}2} \qquad \text{(Eq 1)}$$

Dans les résultats présentés dans le tableau suivant, les coordonnées des centres x_0, y_0 et z_0 sont égales à zéro car le système de coordonnées a été translaté vers le centre de la sphère. Le tableau suivant résume les coordonnées (xi, yi, zi) mesurant 25 points et la distance radiale correspondante.

Points	Les coordonnées des 25 points mesurés sur la sphère			
	xi	yi	zi	Distance radiale ρ
1	-0.001	-0.001	14.999	14.9990
2	0.001	10.199	10.999	14.9999
3	-10.2	0	10.998	14.9999
4	0	-10.198	11	15.0000
5	10.199	0	10.999	14.9999
6	10.995	4.805	9	14.9993
7	4.804	10.996	9	14.9997
8	-4.805	10.995	9	14.9993
9	-10.998	4.799	8.999	14.9989
10	-10.996	-4.804	8.999	14.9991
11	-4.806	-10.995	9	14.9996
12	4.806	-10.994	9.001	14.9995
13	10.995	-4.804	9.001	14.9995
14	10.223	10.222	3.998	14.9994
15	-10.223	10.221	3.999	14.9990
16	-10.223	-10.222	3.999	14.9997
17	10.222	-10.222	4.001	14.9996
18	13.84	-5.783	-0.001	14.9996
19	13.841	5.781	0	14.9998
20	5.776	13.843	0	14.9997
21	-5.78	13.841	0	14.9994
22	-13.842	5.778	0.001	14.9995
23	-13.841	-5.779	0.002	14.9990
24	-5.771	-13.845	0	14.9996
25	5.778	-13.842	0	14.9995

Tableau 2 : La distance radiale des 25 points palpés sur la sphère

Nous avons appliqué la méthode d'association de surface développée par P. Bourdet et A. Clément à l'ENS de Cachan dans les années 75 pour calculer les défauts sphériques. Le principe de cette méthode est de considérer tout type d'éléments géométriques pouvant définir une forme idéale à travers un tableau (x_i, y_i, z_i, a_i, b_i, c_i) et de placer les éléments géométriques sous une forme générale.

- (x_i, y_i, z_i) sont les coordonnées des points théoriques M_{thi} de la surface idéale.
- (a_i, b_i, c_i) représentent les coordonnées des normales $\overrightarrow{n_i}$ en ces points, l'élément géométrique réel est défini par la mesure suivant les normales $\overrightarrow{n_i}$, des écarts ξ_i entre les points mesurées Mi et les points théoriques M_{thi} correspondant.

L'ensemble des points palpés M_i définissent la surface fabriquée, ensuite, nous coïncidons les n points palpés M_i de la surface fabriquée avec les n points théoriques Mthi correspondants de la surface idéale nominale. Puis, nous calculons pour tous les autres couples de points [M_i, M_{thi}] et suivant la normale $\overrightarrow{n_i}$, les écarts de mesures $\xi_i = \overrightarrow{M_{thi}M_i}.\overrightarrow{n_i}$.

Les points théoriques sont très proches des points mesurés, on fait varier alors d'un petit déplacement l'élément géométrique idéal pour le placer au mieux de l'ensemble des points mesurés, voir figure ci-dessous.

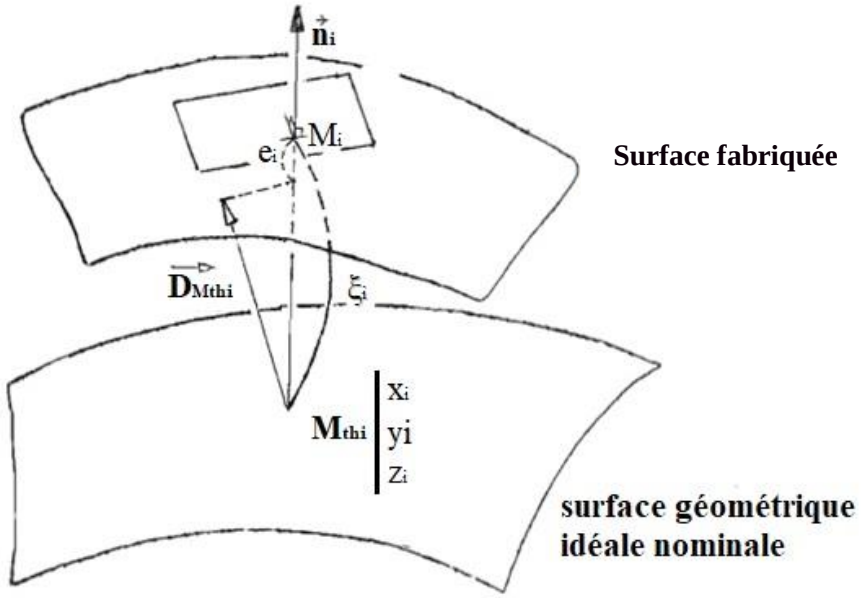


Figure 16 : Méthode d'association des surfaces pour le cas d'une sphère.

Nous désignons par $[T_A] = \{\vec{R} / \overrightarrow{D_A}\}$ Le torseur de petit déplacement permettant à la surface géométrique idéale de coïncider avec la surface fabriquée d'une manière significative.

Nous minimisons les écarts de superpositions en donnant un déplacement DM_{thi} tel que la position finale de M_{thi} soit tangente à M_i. Cet écart est écrit algébriquement sous la forme suivante :

$$e_i = \xi_i - (\overrightarrow{DM}_{th_{i/A}} . \vec{n}_i) \quad \text{(Eq 2)}$$

À partir d'un point de référence A, nous écrivons le champ de déplacement infiniment petit :

$$\overrightarrow{DM}_{th_{i/A}} = \overrightarrow{D_A} + \overrightarrow{AM_{thi}} \wedge \vec{R}) \quad \text{(Eq 3)}$$

L'équation $e_i = \xi_i - (\overrightarrow{DM}_{th_{i/A}} . \vec{n}_i)$ (Eq 2) devient :

$$e_i = \xi_i - (\overrightarrow{D_A} . \vec{n}_i + \overrightarrow{AM_{thi}} \wedge \vec{n}_i) . \vec{R}) \quad \text{(Eq 4)}$$

Si on écrit le torseur des coordonnées plukériennes du vecteur n_i sous la forme :

$$[P_i]_A = \left\{ \vec{n}_i \; / \; \overrightarrow{AM}_{thi} \wedge \vec{n}_i \right\} \quad \text{(Eq 5)}$$

Alors, l'écart e_i est écrit sous la forme condensée :

$$e_i = \xi_i - ([P_i]_A \times [T_A]) \quad \text{(Eq 6)}$$

Nous écrivons par la suite une relation analogue pour chaque point de mesure. Nous obtenons un système de p équations linéaires pour 6 inconnues qui sont les composantes du torseur de petit déplacement.

La résolution de ce système repose sur la méthode de Gauss pour le critère de moindre carrée qui est de minimiser la fonction W définie par la somme des carrées des résidus e_i^2 :

$$W = \sum_{i=1}^{i=n} \left(\xi_i - ([P_i]_A * [T_A]) \right)^2 \quad \text{(Eq 7)}$$

Dans le cas général, nous aurons :

$$\frac{\partial W}{\partial \alpha} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial \beta} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial \gamma} = 0 \quad \text{(Eq 8)}$$

$$\frac{\partial W}{\partial u} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial v} = 0 \quad \frac{\partial W}{\partial w} = 0$$

Ce système est évidemment linéaire et la résolution donne un torseur de déplacement qui correspond au balançage optimal des moindres carrée de la surface idéale nominale pour l'amener au mieux des points palpés.

Dans le cas d'une sphère et de tout point de la surface, les coordonnées du point théorique nominal Mthi (xi, yi, zi) correspondent à la normale théorique n_i définie par son sinus et ses cosinus ai, bi et ci, et l'écart ξi mesuré le long de la normale ni.

Les points M_i sont obtenus après translation et rotation des points de mesures pour amener la surface géométrique idéale nominale centrée sur l'axe de la machine d'axe (O ; xi, yi, zi) de la machine à mesurer.

On appelle : $$\vec{n}_i = \begin{vmatrix} \cos\beta_i \cos\theta_i \\ \cos\beta_i \sin\theta_i \\ \sin\beta_i \end{vmatrix} \quad \text{(Eq 9)}$$

Et : $$\xi_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} - R \quad \text{(Eq 10)}$$

Et : $$\overrightarrow{M}_{thi} = \begin{vmatrix} R\cos\beta_i \cos\theta_i \\ R\cos\beta_i \sin\theta_i \\ R\sin\beta_i \end{vmatrix} \quad \text{(Eq 11)}$$

Avec : R est le rayon de l'élément géométrique nominale.

$$\sin\theta_i = \frac{y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \quad \text{(Eq 12)} \qquad \sin\beta_i = \frac{z_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \quad \text{(Eq 13)}$$

$$\cos\theta_i = \frac{x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \quad \text{(Eq 14)} \qquad \cos\beta_i = \frac{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}} \quad \text{(Eq 15)}$$

Soit le torseur des coordonnées plukériennes de n_i :

$$\{P_i\}_o = \begin{Bmatrix} \cos\beta_i \cos\theta_i & 0 \\ \cos\beta_i \sin\theta_i & / 0 \\ \sin\beta_i & 0 \end{Bmatrix} \quad \text{(Eq 16)}$$

Et le torseur de petit déplacement : $$\{T\}_o = \begin{Bmatrix} 0 & u \\ 0 & / v \\ 0 & w \end{Bmatrix} \quad \text{(Eq 17)}$$

ei est écrite alors sous la forme :

$$e_i = \xi_i - (u\cos\beta_i\cos\theta_i + v\cos\beta_i\sin\theta_i + w\sin\beta_i + \Delta r) \quad \text{(Eq 18)}$$

Et si nous dérivons la fonction $w = \sum_{i=1}^{n} e_i^2$ (Eq 19) par rapport aux variables de l'équation e_i et qui sont (u, v, w, et r) :

On obtient le système suivant : $$|A| * \begin{vmatrix} u \\ v \\ w \\ r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum \xi_i \cos\beta_i \cos\theta_i \\ \sum \xi_i \cos\beta_i \sin\theta_i \\ \sum \xi_i \sin\beta_i \\ \sum \xi_i \end{vmatrix} \quad \text{(Eq 20)}$$

Avec :

$$|A| = \begin{vmatrix} \sum \cos\beta_i^2 \cos\theta_i^2 & \sum \cos\beta_i^2 \sin\theta_i \cos\theta_i & \sum \cos\beta_i \sin\beta_i \cos\theta_i & \sum \cos\beta_i \cos\theta_i \\ \sum \cos\beta_i^2 \sin\theta_i \cos\theta_i & \sum \cos\beta_i^2 \sin\theta_i^2 & \sum \cos\beta_i \sin\beta_i \sin\theta_i & \sum \cos\beta_i \sin\theta_i \\ \sum \cos\beta_i \sin\beta_i \cos\theta_i & \sum \cos\beta_i \sin\beta_i \sin\theta_i & \sum \sin\beta_i^2 & \sum \sin\beta_i \\ \sum \cos\beta_i \cos\theta_i & \sum \cos\beta_i \sin\theta_i & \sum \sin\beta_i & n \end{vmatrix} \quad \text{(Eq 21)}$$

Calcul des résultats

Soit alors l'écart ξ_i des 25 points mesurés sur la boule de référence ayant un rayon nominal égale à R=15mm :

Points	Points mesurés par machine			
	x	y	z	$\xi_i = \sqrt{(x^2+y^2+z^2)}-R$
1	-0,001	-0,001	14,999	-0,000 999
2	0,001	10,199	10,999	-0,000 079
3	-10,2	0	10,998	-0,000 133
4	0	-10,198	11	-0,000 026
5	10,199	0	10,999	-0,000 079
6	10,995	4,805	9	-0,000 731
7	4,804	10,996	9	-0,000 318
8	-4,805	10,995	9	-0,000 731
9	-10,998	4,799	8,999	-0,001 053
10	-10,996	-4,804	8,999	-0,000 918
11	-4,806	-10,995	9	-0,000 411
12	4,806	-10,994	9,001	-0,000 544
13	10,995	-4,804	9,001	-0,000 451
14	10,223	10,222	3,998	-0,000 566

15	-10,223	10,221	3,999	-0,000 980
16	-10,223	-10,222	3,999	-0,000 299
17	10,222	-10,222	4,001	-0,000 447
18	13,84	-5,783	-0,001	-0,000 377
19	13,841	5,781	0	-0,000 225
20	5,776	13,843	0	-0,000 305
21	-5,78	13,841	0	-0,000 610
22	-13,842	5,778	0,001	-0,000 458
23	-13,841	-5,779	0,002	-0,000 995
24	-5,771	-13,845	0	-0,000 384
25	5,778	-13,842	0	-0,000 458

Tableau 3 : Tableau des écarts ξi entre la distance radiale des 25 points et le rayon nominale de la sphère

Et :

A			
9,3422	-0,0003	-0,0003	-0,0005
-0,0003	9,3425	-0,0003	-0,0006
-0,0003	-0,0003	6,3154	9,800
-0,0005	-0,0006	9,800	25

Alors :

u	**1,88 E-05**	v	**-6,27 E-05**
w	**– 3,01 E-06**	Δr	**-5,02 E-05**

Soit alors l'écart minimal pour chaque point mesuré sur la sphère :

Points	**Les points mesurés par machine**			
	xi	yi	zi	ei
1	-0,001	-0,001	14,999	-0,000 49
2	0,001	10,199	10,999	0,000 47
3	-10,2	0	10,998	0,000 50
4	0	-10,198	11	0,000 44

5	10,199	0	10,999	0,000 30
6	10,995	4,805	9	-0,000 35
7	4,804	10,996	9	0,000 17
8	-4,805	10,995	9	-0,000 12
9	-10,998	4,799	8,999	-0,000 39
10	-10,996	-4,804	8,999	-0,000 30
11	-4,806	-10,995	9	0,000 11
12	4,806	-10,994	9,001	-0,000 15
13	10,995	-4,804	9,001	-0,000 11
14	10,223	10,222	3,998	-0,000 15
15	-10,223	10,221	3,999	-0,000 31
16	-10,223	-10,222	3,999	0,000 29
17	10,222	-10,222	4,001	-0,000 12
18	13,840	-5,783	-0,001	-0,000 07
19	13,841	5,781	0	0,000 13
20	5,776	13,843	0	0,000 18
21	-5,780	13,841	0	0,000 02
22	-13,842	5,778	0,001	0,000 24
23	-13,841	-5,779	0,002	-0,000 34
24	-5,771	-13,845	0	0,000 13
25	5,778	-13,842	0	-0,000 09
		Sup (ei) (mm)		0,000 50
		Inf(ei) (mm)		-0,000 49
		d=sup(ei)-Inf(ei) (mm)		0,000 99

Tableau 4 : Les résultats du test d'acceptation sur l'erreur de palpage selon la norme ISO10360-2

Compte tenu des incertitudes de mesures, Si la plage **d= sup (ei) – Inf (ei)** des vingt-cinq distances radiales n'est pas supérieure à la valeur indiquée par le fabricant **M_{PEP}**, la vérification des performances du système de palpage est confirmée. Nous allons vérifier cette condition dans la partie de calcul des incertitudes associées.

b) Calcul de l'incertitude sur l'erreur de palpage : (incertitude élargie)

Les incertitudes sur les sources d'erreurs affectant le système de mesurage sur une Machine à mesurer tridimensionnelles sont classées dans le tableau 2 suivant. L'incertitude élargie (U_{Ep})

mentionnée dans ce tableau est celle correspondante à deux fois l'incertitude type composée (uc). Différentes sources d'incertitude doivent être prises en compte lors du calcul : répétabilité, résolution de la machine, sphère standard, température, dilatation du matériau de la sphère et du stylet, direction du stylet (direction d'approche), vitesse "d'accostage", pression mesurée.

Composante d'incertitude	**Source d'incertitude**	**Loi**	**Valeur de l'incertitude type u (xi)**		**Sensibilité**	**Ui**
			b	**a**	**Ci =∂f/∂xi**	
U_{A1}	Répétabilité (loi normale entre Rmax et Rmin à 99,73%)	Type A	0,000 316 2		1	3,162 E-04
U_{B1} (sphère)	Etalonnage de la sphère	Normale (intervalle de confiance de 95,45%)	0,000 52	0	1	5,2 E-04
	Incertitude sur la variation de rayon	Normale (à 95,45%)	0,000 00		1	0
	La variation de rayon	Normale (à 99,73%)	0,000 00		1	0
	Dérive du rayon	Normale (à 95,45%)	0,000 52	0	1	5,2 E-04
U_{B2}	Coefficient de dilatation thermique	Uniforme		5,77 E-08	1	1,732E-06
U_{B3}	Variation de la Température entre le stylet et la sphère	Uniforme		0,057 735 0	1 E-07	1,732E-07
U_{B4}	Résolution de la MMT	Triangulaire	0,000408248		1	4,082E-04
U_{B5}	Inclinaison du palpeur	/	0,000 00	0	1	0
U_{B6}	Pression de mesure	/	0,000 00	0	1	0
				U_{Ep}		**±1,8 µm**

Tableau 5 : Tableau des incertitudes sur les grandeurs affectant l'erreur de palpage.

Dans notre cas, en référence à la norme fixée par le fabricant de la machine de mesure 3D, l'erreur de palpage maximale admissible est définie par la formule suivante : **M_{PEP}=±4µm+5*L/1000** et elle prend la valeur **M_{PEP} =4.15µm**,

De ce fait, en se basant sur cette norme, la performance du système de palpage est jugée conforme si la somme de la valeur absolue de l'erreur de palpage Ep et de l'incertitude élargie U_{EP}, calculée par l'identification des grandeurs affectant la prise de mesure, est inférieure à la valeur indiquée par le fabricant suivant le certificat d'étalonnage du palpeur TP2.

En effet, **Ep= 0.99 µm**, **U_{Ep}=1.8 µm** et **M_{PEP}=4.15 µm**,

Alors, **$|Ep| + U_{EP}$ =2.7 µm <M_{PEP}= 4.15 µm** et on peut conclure que le test effectué sur le système de palpage est concluant et les mesures sont vérifiés.

c) L'erreur de taille

Pour effectuer le test d'acceptation, la longueur d'essai doit être mesurée dans sept combinaisons différentes de position et d'orientation [81], trois des positions étant choisies par l'opérateur. Les quatre positions restantes sont constituées par les diagonales spatiales. Pour chacune des sept orientations, cinq longueurs d'essai sont mesurées et répétées trois fois. La démarche expérimentale est réalisée dans les conditions suivantes :

- La machine : Type : MMT à portique Mitutoyo euro C544 (Figure 17) ;

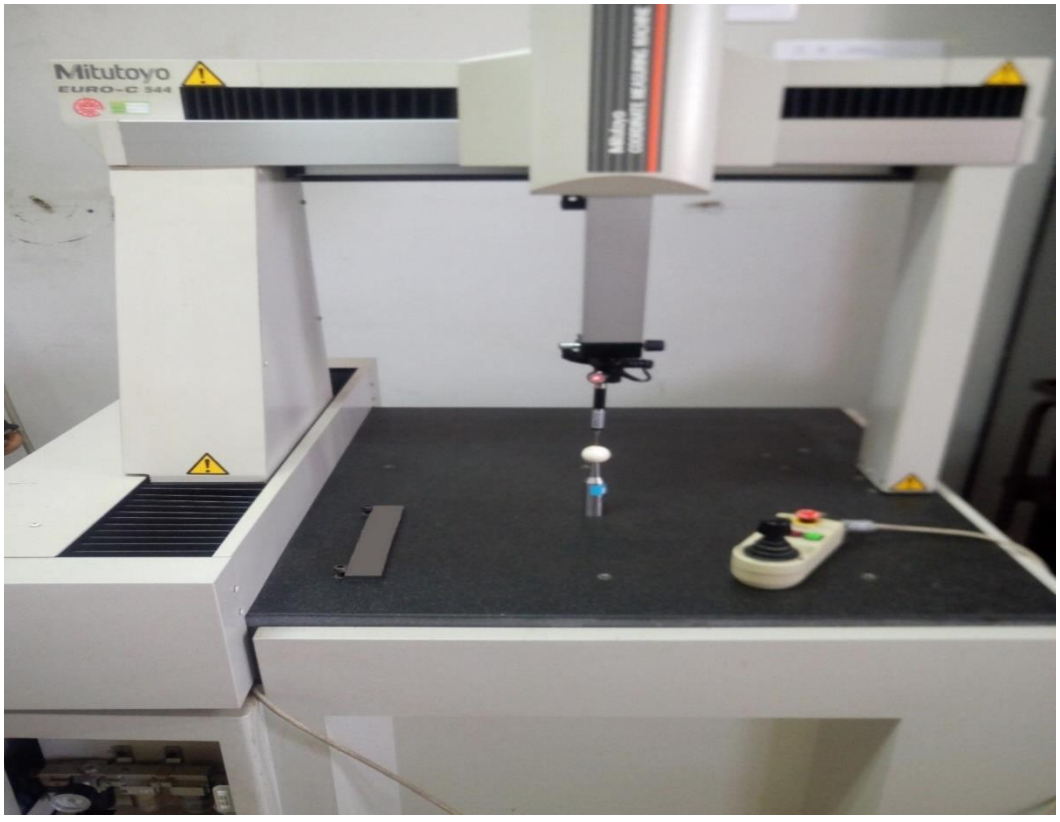


Figure 17 : Machine à mesurer tridimensionnelle utilisée

- Capacité X= 500 mm, Y=500 mm, Z= 400 mm.
- Ecart maximal toléré sur les longueurs EMT_{ET}=±(4µm+L/200) avec L en mm.
- Pièces mesurées : Cales étalons de longueur L=125mm, L=150mm, L=175mm, L=200mm et L=250mm.
- Type de palpeur : Palpeur TP2.
- Milieu : La machine est installée dans une salle climatisée, la température est régulée à 20°±2°C.

On Mesure par rapport au repère de mesure défini dans la figure ci-dessous :

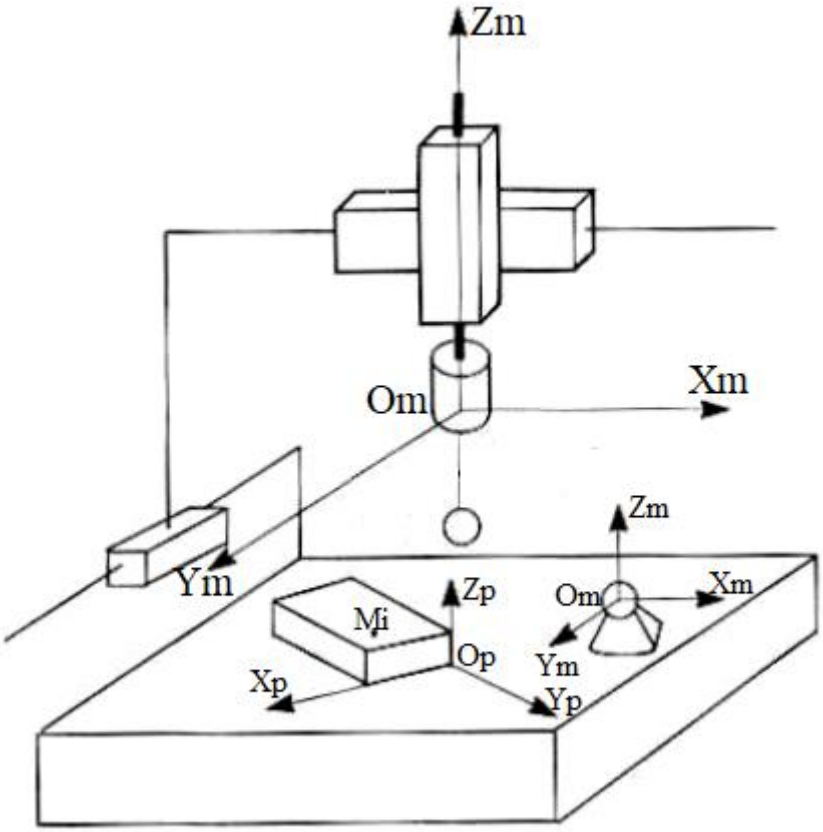


Figure 18 : Repère mesure et repère machine

La position de la cale est prise pour qu'elle soit à peu près parallèle à l'axe X de la position 1, parallèle à l'axe Y de la position 2 et parallèle à l'axe Z de la position 3. Les positions sélectionnées 4, 5 et 6 appartiennent tour à tour à ces plans XY. ZX et YZ et forment un angle de 45 ° par rapport au plan de marbre. Par ailleurs, la position 7 est prise dans le plus grand volume de mesure XYZ.

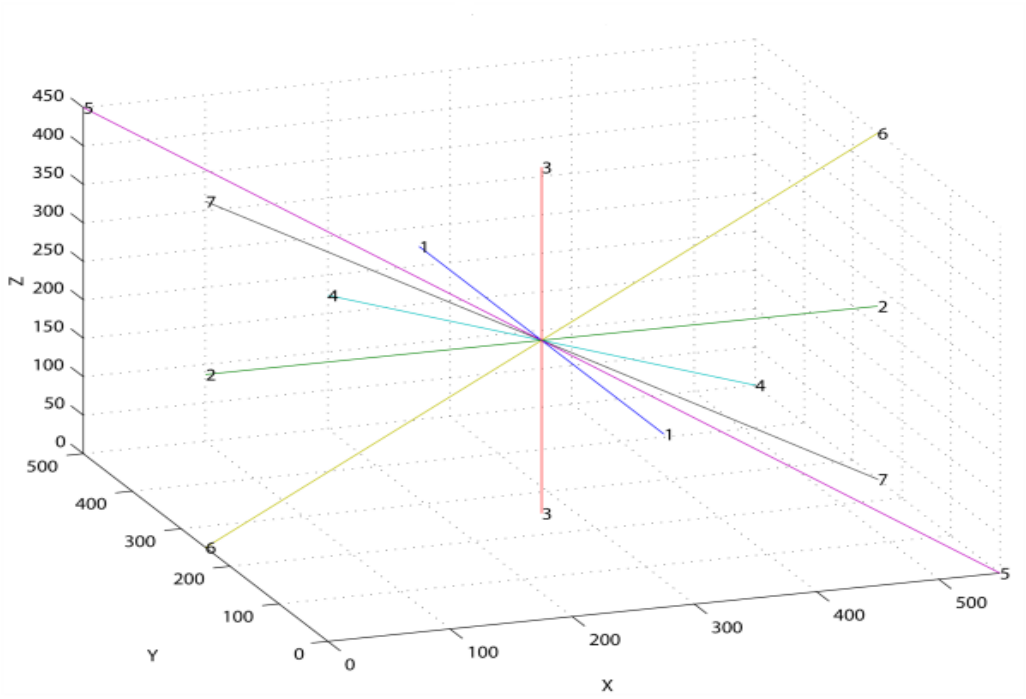


Figure 19 : Les lignes de mesure de l'erreur de taille selon la norme 103360-2

Le nombre de points acquis à partir de chaque position est de 4 : un côté du coin est de 3 points pour mesurer le plan, et l'autre côté est de 1 point pour mesurer les points. Par rapport au point de référence (O, x, y, z) lié au coin, les coordonnées du point de mesure sont données, le processus est le même pour les autres positions. La distance est donnée par la fonction distance du logiciel informatique de la machine.

Pour chacune des sept configurations, l'opérateur doit prendre et enregistrer les mesures des cinq longueurs d'essai, chaque longueur d'essai étant mesurée trois fois. Les quinze mesures sur les cinq longueurs de test dans une position et une orientation sont considérées comme une configuration. Après l'achèvement de l'essai dans les sept configurations, un total de 105 mesures

a été fait. Le tableau ci-dessous donne les résultats de l'essai expérimental réalisé sur notre MMT :

Vn (mm)	125,00004			175,0006			150,0004			200,0006			250,0006		
$E_{L, MPE}$ (µm)	4,62			4,87			4,75			5			5,25		
P1 (x)															
Mesures (mm)	124,998	124,999	124,999	174,999	174,998	174,999	150,001	149,998	149,999	199,999	199,998	199,999	249,998	249,998	249,999
$\lvert E_T \rvert$ (µm)	2,0	1,0	1,0	1,1	2,1	1,1	0,6	2,4	1,4	1,6	2,6	1,6	2,6	2,6	1,6
R_0 (µm)	0,58			0,58			1,53			0,58			0,58		
P2 (y)															
Mesures (mm)	124,999	124,998	124,999	174,999	175,001	174,999	149,999	150,002	150,001	199,999	200,002	199,999	249,999	249,999	249,999
$\lvert E_T \rvert$ (µm)	1,04	2,04	1,04	1,06	0,94	1,06	1,4	1,6	0,6	1,6	1,4	1,6	1,6	1,6	1,6
R_0 (µm)	0,58			1,15			1,53			1,73			0		
P3 (z)															
Mesures (mm)	124,999	125,000	125,001	174,999	175,001	174,998	149,999	149,999	149,998	199,998	199,999	200,001	249,999	250,001	250,000
$\lvert E_T \rvert$ (µm)	1,04	0,04	0,96	1,06	0,94	2,06	1,4	1,4	2,4	2,6	1,6	0,4	1,6	0,4	0,6
R_0 (µm)	1			1,53			00:58			1,53			1		
P4 (xy)															
Mesures (mm)	124,998	124,999	124,999	174,999	174,998	174,999	150,001	149,998	149,999	199,999	199,998	199,999	249,998	249,998	249,999
$\lvert E_T \rvert$ (µm)	2,04	1,04	1,04	1,06	2,06	1,06	0,6	2,4	1,4	1,6	2,6	1,6	2,6	2,6	1,6
R_0 (µm)	0,58			0,58			1,53			0,58			0,58		
P5 (zx)															
Mesures (mm)	124,999	125,000	125,001	174,999	175,001	174,998	149,999	149,999	149,998	199,998	199,999	200,001	249,999	250,001	250,000
$\lvert E_T \rvert$ (µm)	1,04	0,04	0,96	1,06	0,94	2,06	1,4	1,4	2,4	2,6	1,6	0,4	1,6	0,4	0,6
R_0 (µm)	1			1,53			00:58			1,53			1		
P6 (yz)															
Mesures (mm)	124,998	124,999	124,999	174,999	174,998	174,999	150,001	149,998	149,999	199,999	199,998	199,999	249,998	249,998	249,999
$\lvert E_T \rvert$ (µm)	2,04	1,04	1,04	1,06	2,06	1,06	0,6	2,4	1,4	1,6	2,6	1,6	2,6	2,6	1,6
R_0 (µm)	0,58			0,58			1,53			0,58			0,58		
P7 (xyz)															
Mesures (mm)	124,999	124,998	124,999	174,999	175,001	174,999	149,999	150,002	150,001	199,999	200,002	199,999	249,999	249,999	249,999
$\lvert E_T \rvert$ (µm)	1,04	2,04	1,04	1,06	0,94	1,06	1,4	1,6	0,6	1,6	1,4	1,6	1,6	1,6	1,6
R_0 (µm)	0,58			1,15			1,53			1,73			0		

Tableau 6 : Les résultats de mesure des 5 cales suivant les 7 positions de la norme 10360-2
Avec E_T est l'erreur de taille et R_0 est l'écart type de répétabilité.

Pour chacune des 105 mesures de longueur, l'erreur de taille E_T est calculée. Cette valeur est la valeur absolue de la différence entre la valeur indiquée de la longueur d'essai concernée et la valeur nominale de la cale étalon. La valeur indiquée peut être corrigée pour tenir compte des erreurs systématiques si la MMT possède des logiciels à cet effet. Si les conditions

environnementales en vigueur pour l'essai sont celles recommandées par le fabricant, alors aucune correction manuelle aux valeurs indiquées ne peut être faite par l'opérateur.

Nous déterminons la plage de reproductibilité des trois mesures de longueurs répétées Ro par l'écart-type des 3 mesures.

L'erreur maximale tolérée de notre machine est donnée par $E_{L, MPE} = 4+L/200$ (µm).

- Pour L=125mm, $E_{125, MPE} = 4+125/200 = 4.62$µm.
- Pour L=150mm, $E_{150, MPE} = 4+150/200 = 4.75$µm.
- Pour L=175mm, $E_{175, MPE} = 4+175/200 = 4.87$µm.
- Pour L=200mm, $E_{200, MPE} = 4+200/200 = 5$µm.
- Pour L=250mm, $E_{250, MPE} = 4+250/200 = 5.25$µm.

Selon la norme ISO10360-2, si l'erreur observée dans les 105 mesures ne dépasse pas le $E_{0,MPE}$ du fabricant, la valeur spécifiée par MPE (représentée par la formule $E_{0, MPE} = A + L / K$, où A est donné par le fabricant en microns, K est la constante sans dimension donnée par le fabricant et L est la longueur mesurée en millimètres, alors la performance de la machine est jugée conforme.

Calcul de l'incertitude de mesure sur l'erreur de taille :

En se référant au diagramme 5M illustré à la figure 14, l'incertitude de l'erreur dimensionnelle dépend de l'incertitude de la grandeur intermédiaire :

Composante d'incertitude u (xi)	Source d'incertitude	Loi	Valeur de l'incertitude type u (xi)		Sensibilité	
			b	a	Ci=∂f/∂xi	Ui
UA1	Répétabilité	Type A	0,000 316 228	0	1	3,162 E-04
UB1 (incertitude sur les étalons)	Étalonnage des cales étalons	Normale	0,000 150 000	0,000 000 750	1	5,25 E-04
	Incertitude sur la variation de longueur	Normale	0,000 000 000	0,000 000 000	1	0
	La variation de longueur	Normale	0,000 066 667	0,000 000 000	1	6,666E-05
	Dérive des cales	Normale	0,000 150 000	0,000 000 750	1	5,25 E-04
UB2 = √2*Δα/2√3	Coefficient de dilatation thermique	Uniforme	0,000 000 000	0,000 0004	1	2,041 E-04
UB3= ΔT/2√3	Variation de la Température entre la cale et l'instrument	Uniforme	0,000 000 000	0,057 735 027	0,000 000 1	2,886E-06
UB4= r/√6	Résolution de la MMT	Triangulaire	0,000408248	0,000 000 000	1	4,082 E-04
UB5	Inclinaison du palpeur	/	0,000 000 000	0,000 000 000	1	0
UB6	Pression de mesure	/	0,000 000 00	0,000 000 00	1	0
				U_{ET}	**2.1µm**	

Tableau 7 : Tableau des incertitudes sur les grandeurs affectant l'erreur de taille

L'incertitude élargie (U_{ET}) mentionnée est celle correspondante à deux fois l'incertitude type composée (u_c). Celle-ci a été calculée en tenant compte des différentes sources d'incertitudes :

répétabilité, résolution de la machine, cales étalons, température, dilatation des matériaux de la cale et du stylet, orientation du stylet, vitesse d'accostage, pression de mesurage.

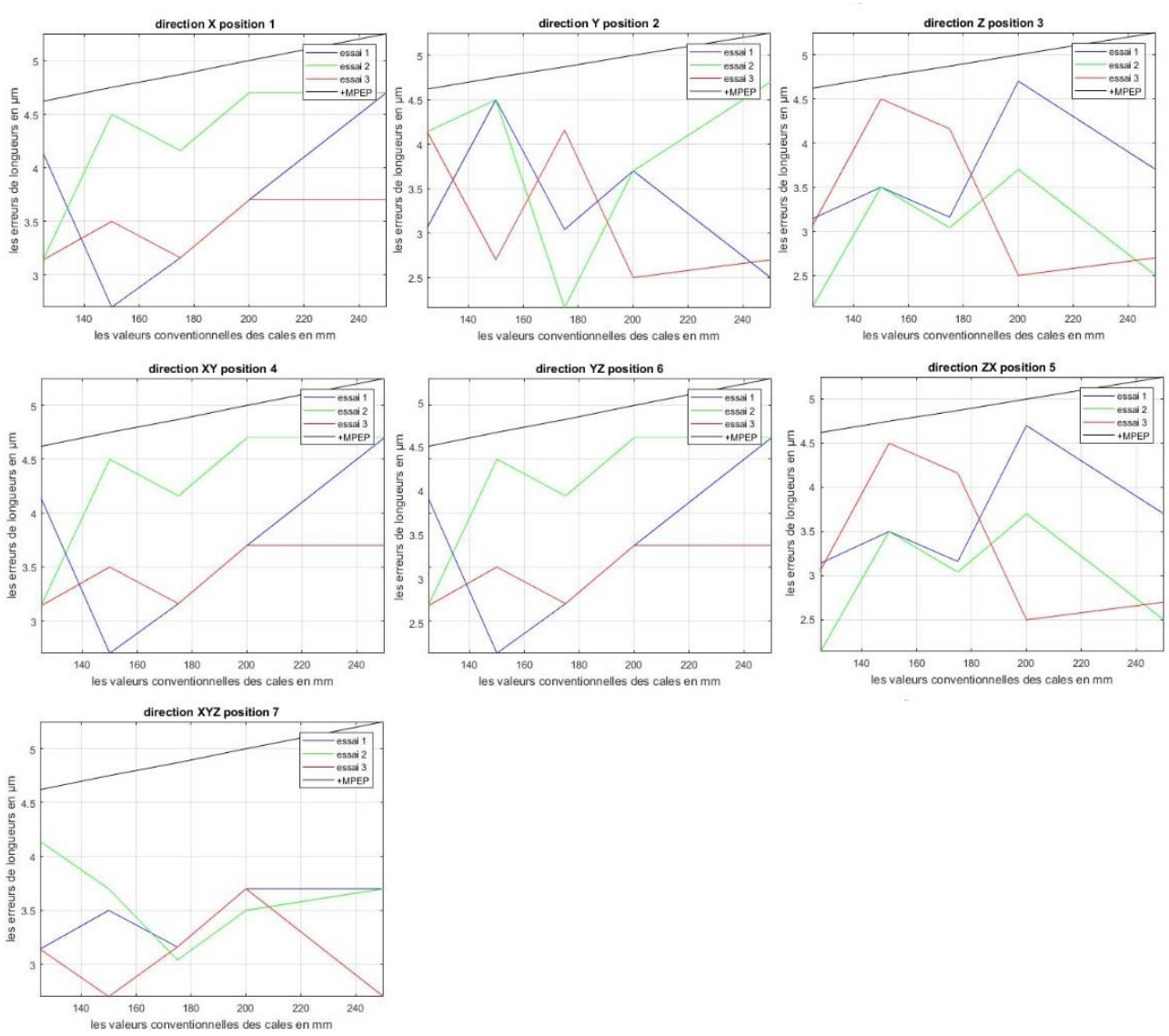


Figure 20 : Les résultats du test d'acceptation sur l'erreur de taille selon la norme ISO10360-2

Les 105 valeurs d'erreur de taille E_T plus l'incertitude associée U_{ET} sont comparées avec les valeurs déclarée de $E_{0,MPE}$ suivant les 7 directions suggérées par la norme ISO10360-2 [59]. Toutes ces valeurs ($|E_T| + U_{ET}$) sont inférieures à $E_{L,MPE}$ correspondant, donc la performance de notre MMT est jugée conforme.

Cette activité de test expérimental nous permet de vérifier notre machine de mesure 3D après avoir mesuré des pièces standards selon la norme 10360-2. L'estimation des erreurs de taille et de palpage a été effectuée. Les résultats trouvés prouvent alors la performance de notre MMT et peut être utilisée pour mesurer les dimensions linéaires.

1.2. Détermination de la valeur corrigée

Introduction

En métrologie scientifique, le but de l'étalonnage est toujours de déterminer l'erreur de l'instrument de mesure ou de l'équipement de mesure afin d'effectuer d'éventuelles corrections. Les erreurs de taille peuvent être corrigées, mais les erreurs de palpage ne peuvent pas être corrigées. L'erreur de palpage permet de vérifier l'erreur d'un système de palpage composé d'un dispositif de palpage, qui comprend trois galets fixés sur un support au moyen de ressorts à trois billes intégrées au corps principal (liaison de Boy).

Pour les mesures traditionnelles réalisées avec du marbre, les météorologues sont tenus de maîtriser la qualité de leurs mesures. En fait, toutes les distances sont mesurées dans une seule direction perpendiculaire à la planche et en référence à un empilement de blocs de jauge. Dans le cas des mesures tridimensionnelles, ce n'est pas le cas, car les météorologues n'ont plus cette compréhension intuitive de la qualité de la distance mesurée. Par conséquent, il doit faire confiance à la machine de mesure pour la mesure directe et ensuite vérifier régulièrement la qualité géométrique.

A tire indicatif, des méthodes de mesure par substitution sont possibles. Ce qui permet d'éliminer les erreurs systématiques de la MMT et de ne faire intervenir que les effets aléatoires de répétabilité et de reproductibilité. Dans ce cas, la machine est utilisée comme moyen de comparaison et pas un moyen de mesure directe. La norme ISO **15530-3** [82] donne quelques éclaircissements sur l'utilisation de ladite méthode ainsi que l'incertitude correspondante.

De plus, deux méthodes complémentaires peuvent être utilisées pour résoudre les problèmes de contrôle qualité de la mesure directe ou de l'identification géométrique des machines de mesure tridimensionnelle. La première méthode consiste à évaluer divers paramètres de mesure de base et indépendants qui caractérisent la géométrie de la machine de mesure par la mesure. Cette méthode est longue à mettre en œuvre et nécessite des ressources de mesure extérieures à la machine et un modèle mathématique pour identifier les erreurs de mesure systématiques dans le volume. Ensuite, en analysant la source d'erreur, l'écart géométrique peut être corrigé mécaniquement ou par logiciel. Cette méthode a donc suscité l'intérêt des fabricants d'équipements de mesure et des services de maintenance.

La deuxième méthode est basée sur la méthode d'évaluation globale de la machine, à cette fin, nous utilisons toutes les méthodes de mesure de la machine (c'est-à-dire les machines, les palpeurs et les systèmes électroniques) pour vérifier les normes physiques et chimiques. La précision des résultats de mesure est une bonne indication du niveau de précision de la machine. La norme utilisée varie d'une méthode à l'autre. Cette approche globale peut également donner quelques indications sur l'origine et la direction des pannes de machines locales. La précision des trois dispositifs de mesure et les défauts d'orthogonalité des trois axes de mesure. Cette méthode convient parfaitement au contrôle qualité des machines à mesurer. En effet, cette méthode est rapide, ne nécessite aucune mesure en dehors de la machine, et peut être mise en œuvre par l'utilisateur, elle met en évidence les éventuelles erreurs géométriques de la machine, mais ne permet pas de les identifier totalement pour appliquer une correction géométrique de la machine.

1.2.1. Modélisation de la valeur corrigée

Dans ce projet de thèse, nous nous intéressons à la deuxième approche qui consiste à modéliser globalement la valeur corrigée, sans identifier précisément les erreurs géométriques ; puisqu'ils seront noyés dans le modèle mathématique. On rappelle que, selon la norme ISO 10360-2, les mesures seront effectuées en plaçant les cales suivant 7 positions et orientations différentes dans les trois axes, les trois plans de référence et suivant la diagonale de l'espace de mesure. La gamme de mesure utilisée consiste à palper un plan sur une des faces de la cale étalon et un point au centre de la face opposée. La valeur mesurée de la cale est obtenue en calculant la distance entre un point et un plan. Chaque cale est mesurée trois fois. Les résultats de mesure obtenus seront exprimés sous la forme d'une matrice de correction. En effet ; nous allons tracer la valeur de référence en fonction des moyennes des valeurs mesurées de chaque cale suivant l'une des directions proposées par la norme (Figure *21* : La moyenne des mesures suivant la direction X).

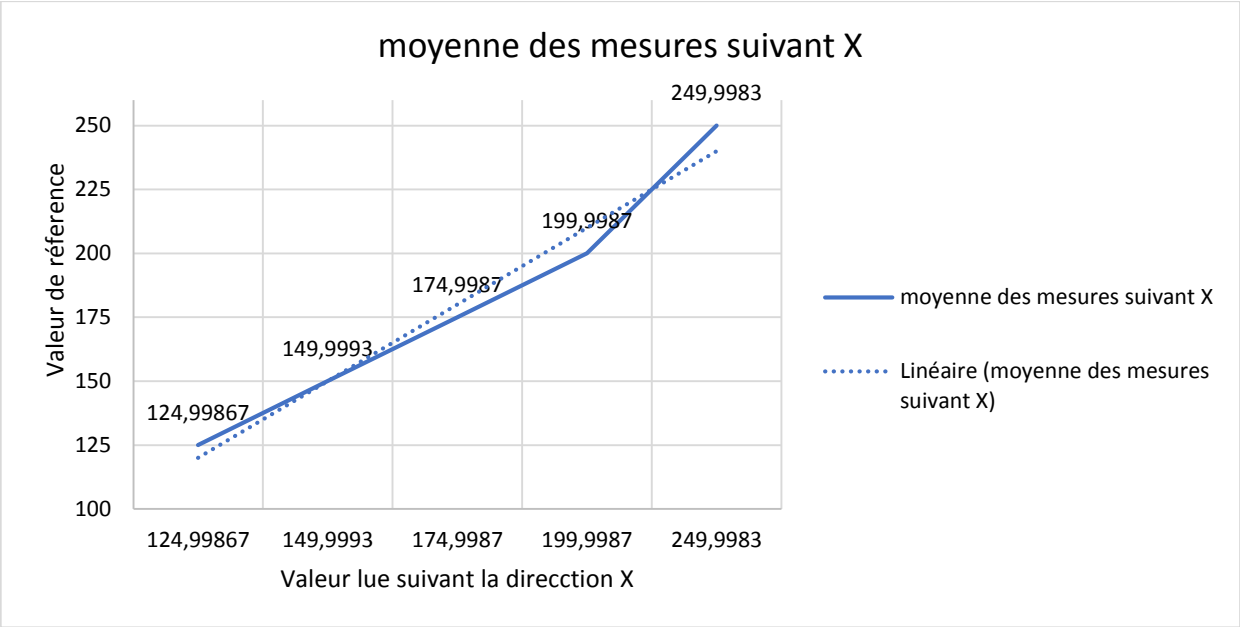


Figure 21 : La moyenne des mesures suivant la direction X

L'objectif principal de ce travail est de minimiser l'erreur entre la valeur mesurée et la valeur de référence. Pour ce faire, nous allons prendre une courbe d'équation de 1er ordre assimilé à une droite. Ces équations des valeurs modélisées vont participer à la contribution du modèle de correction.

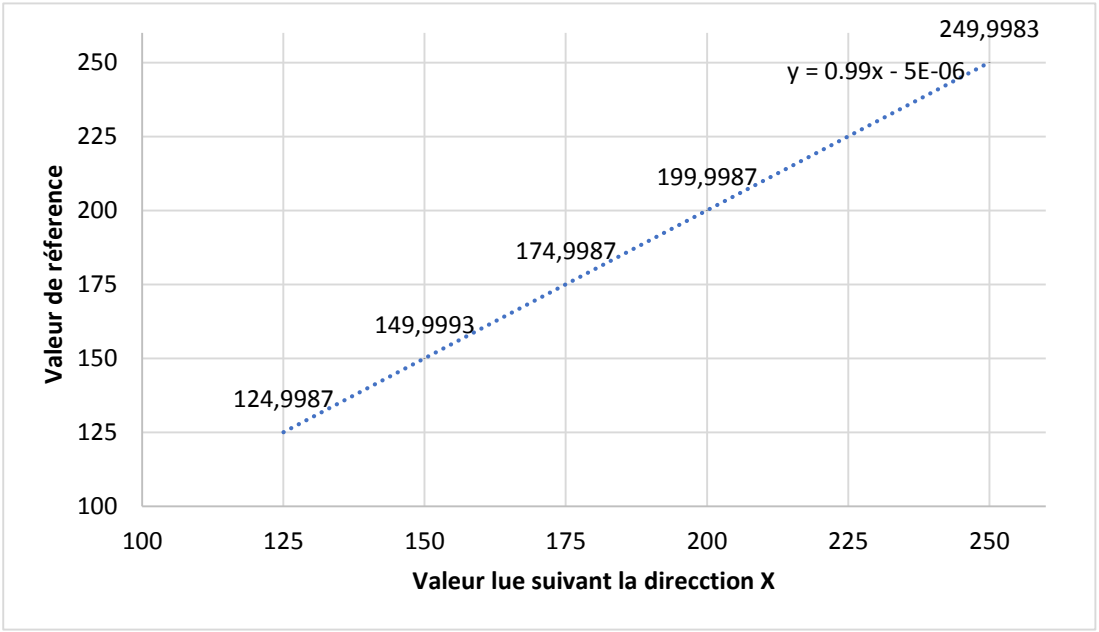


Figure 22 : Courbe d'étalonnage de la valeur lue suivant la direction x

En vue de déterminer la matrice de correction, nous allons procéder comme suit :

1- Définir les équations des sept orientations/positions ;

2- Déduire les écarts modèles en fonction des équations des valeurs modélisées.

Les courbes d'étalonnage suivant les 7 Directions X, Y, Z, XY, YZ, XZ et XYZ peuvent être écrite sous la forme suivante :

$$P_1(x) : \quad P_{/x} = A_x \times V_{lue/x} + B_x \qquad \text{(Eq 22)}$$

$$P_2(y) : \quad P_{/y} = A_y \times V_{lue/y} + B_y \qquad \text{(Eq 23)}$$

$$P_3(z) : \quad P_{/z} = A_z \times V_{lue/z} + B_z \qquad \text{(Eq 24)}$$

$$P_4(xy) : \quad P_{/xy} = A_{xy} \times V_{lue/xy} + B_{xy} \qquad \text{(Eq 25)}$$

$$P_5(xz) : \quad P_{/xz} = A_{xz} \times V_{lue/xz} + B_{xz} \qquad \text{(Eq 26)}$$

$$P_6(yz) : \quad P_{/xz} = A_{yz} \times V_{lue/yz} + B_{yz} \qquad \text{(Eq 27)}$$

$$P_7(xyz) : \quad P_{/xyz} = A_{xyz} \times V_{lue/xyz} + B_{xyz} \qquad \text{(Eq 28)}$$

Où :

- A_x, A_y et A_z, A_{xy}, A_{xz}, A_{yz}, et A_{xyz} sont respectivement les pentes de la courbe d'étalonnage ;
- B_1, B_2 et B_3, B_{xy}, B_{xz}, B_{yz}, et B_{xyz} sont respectivement les ordonnées à l'origine de la courbe d'étalonnage.

En fonction de la moyenne des valeurs mesurées et des valeurs de références, nous déterminons les coefficients A_i et B_i en appliquant la formule de régression linéaire.

A_x	1,00000895	B_x	-0,00000522
A_y	0,99999814	B_y	0,00127406
A_z	1,00000103	B_Z	0,00068850
A_{xy}	1,00000895	B_{xy}	-0,00000522
A_{xz}	1,00000103	B_{xz}	0,00068850
A_{yz}	1,00000895	B_{yz}	-0,00000522
A_{xyz}	1,00000337	B_{xyz}	0,00006689

Tableau 8 : Tableau des coefficients des droites d'étalonnage suivant les 7 positions de la norme ISO10360-2

1.2.2. Résultats et Interprétations

Les valeurs corrigées suivant les 7 directions et pour les 5 cales sont données sur Le tableau suivant :

Vcorrigé=a*VLue+b					
Vref	125,0000	150,0004	175,0001	200,0006	250,0006
vlx	124,9998	150,0007	175,0002	200,0005	250,0006
vly	125,0000	150,0000	175,0006	200,0006	250,0005
vlz	125,0008	149,9995	175,0002	200,0002	250,0009
vlxy	124,9998	150,0007	175,0002	200,0005	250,0006
vlzx	125,0008	149,9995	175,0002	200,0002	250,0009
vlyz	124,9998	150,0007	175,0002	200,0005	250,0006
vlxyz	124,9992	150,0012	175,0003	200,0007	250,0002

Tableau 9 : Les valeurs corrigées par le modèle de correction

Afin de comparer la valeur corrigée avec la valeur mesurée, nous recherchons l'erreur de modèle égale à la différence entre la valeur corrigée et la valeur de référence. L'erreur de modèle est donnée par la forme suivante : Ei = P / i-Vref, où Il correspond en quelque sorte à l'erreur résiduelle de la valeur de référence par rapport à la ligne modélisée.

Avec :

- Vref : Valeur de référence
- Ei : L’erreur modèle

Nous pouvons écrire E_i sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} E_i(x) \\ E_i(y) \\ E_i(z) \\ E_i(xy) \\ E_i(xz) \\ E_i(yz) \\ E_i(xyz) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_x \times V_{lue_x} + B_x \\ A_y \times V_{lue_y} + B_y \\ A_z \times V_{lue_z} + B_z \\ A_{xy} \times V_{lue_{xy}} + B_{xy} \\ A_{xz} \times V_{lue_{xz}} + B_{xz} \\ A_{yz} \times V_{lue_{yz}} + B_{yz} \\ A_{xyz} \times V_{lue_{xyz}} + B_{xyz} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} V_{ref}(x) \\ V_{ref}(y) \\ V_{ref}(z) \\ V_{ref}(xy) \\ V_{ref}(xz) \\ V_{ref}(yz) \\ V_{ref}(xyz) \end{pmatrix} \quad \text{(Eq 29)}$$

En introduisant les valeurs de références et ceux obtenues par notre correction. On trouve les valeurs des erreurs modèles suivantes :

	Ei=A*Vlue+B-Vref				
	125 mm	150 mm	175 mm	200 mm	250 mm
Eix	-0,0003	0,0003	0,0002	-0,0001	0,0000
Eiy	0,0000	-0,0004	0,0006	0,0000	-0,0001
Eiz	0,0008	-0,0009	0,0001	-0,0004	0,0003
Exy	-0,0003	0,0003	0,0002	-0,0001	0,0000
Exz	0,0008	-0,0009	0,0001	-0,0004	0,0003
Eyz	-0,0003	0,0003	0,0002	-0,0001	0,0000
Exyz	-0,0009	0,0008	0,0003	0,0001	-0,0004

Tableau 10 : Les erreurs modèles entre la valeur corrigée par le modèle et la valeur de référence

On constate avec cette proposition de correction, que l'erreur maximale du modèle, en valeur absolue est de 0,9µm et en rajoutant l'incertitude associée, reste inférieure à l'erreur maximale tolérée de la machine MMT.

Par ailleurs, nous avons essayé de modéliser le problème afin de déterminer les erreurs suivant les différentes directions proposées par la norme ISO 10360-2, et ce entre la valeur de référence et celle proposée par notre modèle de correction. L'erreur maximale de ce modèle est de

0,9µm, On a également procédé par le chemin inverse et validé les résultats obtenus en se référant aux valeurs de références.

Conclusion

Dans cette partie de l'étude, le test de 105 valeurs mesurées nous a permis de modéliser les valeurs corrigées selon la norme ISO 10360-2 pour l'étalonnage des machines à mesurer tridimensionnelles. Une démarche détaillée pour la réalisation de l'essai ainsi qu'un calcul de la valeur corrigée ont été développés. Donc il nous reste de calculer l'incertitude lié à cette valeur corrigée qui dépend des coefficients a_i et b_i des droites d'étalonnage et de la valeur lue Le calcul se fait selon deux méthodes, l'une est une méthode d'analyse appelée GUM, et l'autre est une méthode basée sur la simulation de Monte Carlo. Le calcul de l'incertitude de mesure nous permettra de vérifier les résultats obtenus dans ce chapitre et de tirer des conclusions sur la validité des corrections proposées.

CHAPITRE III : Calcul des incertitudes de mesures

Introduction

Le but de ce chapitre est d'introduire le sujet de l'incertitude de mesure sur le modèle proposé pour la valeur de correction dans le chapitre précédent. Chaque mesure comporte une erreur et le résultat de la mesure ne peut être donné que si l'incertitude correspondante est déclarée ultérieurement. Plusieurs causes de mesure peuvent affecter la qualité des résultats ; telles que l'instrument de mesure, l'élément mesuré, l'environnement, l'opérateur…. L'estimation de ces incertitudes de mesures est basée sur l'analyse statistique de toutes les séries de mesures et de toutes les causes agissant sur la qualité des résultats.

Par ailleurs, il est nécessaire de distinguer entre les incertitudes et les concepts d'erreur. Il est désormais reconnu que même si toutes les erreurs ont été évaluées et correctement corrigées, il convient de déterminer l'incertitude sur cette correction. Il est vrai qu'il est impossible de connaître l'erreur avec précision et de faire la meilleure correction, mais elle sera toujours affectée par l'incertitude. Ce chapitre concerne l'évaluation de l'incertitude de mesure sur la matrice de correction. D'une part, c'est par la méthode d'analyse GUM, et d'autre part, par Monte-Carlo, qui est une simulation basée sur les résultats d'application de la norme ISO 10360-2.

Chaque fois qu'une mesure est effectuée, le résultat n'est jamais exact. Peu importe la prudence ou la science, chaque mesure est sensible à l'erreur et à l'incertitude. Une mesure est la meilleure estimation quantitative d'une observation limitée par un ou plusieurs facteurs d'influence. Ces contraintes établissent le doute dans le résultat observé et introduisent le concept d'incertitude qui est un paramètre caractérisant la qualité des données de mesure.

La qualité des certificats émis au client est liée aux résultats et conclusions des métrologues faites après les mesures effectuées. Par conséquent, l'évaluation de l'incertitude peut contrôler la capabilité de mesure, déclarer la conformité de la machine et en tirer des opinions et des explications. Ainsi, l'insertion et la sensibilisation à l'incertitude dans la mesure est plus importante pour bien comprendre la signification du mot incertitude et estimer correctement le nombre de chiffres significatifs à retenir dans le résultat et de réaliser une critique plus constructive du protocole expérimental.

1. Évaluation des incertitudes de mesures par l'approche GUM

Selon la norme d'accréditation des laboratoires d'étalonnage et d'essais ; ISO/IEC 17025 [83] qui couvre la traçabilité aux résultats de mesure entachée de son incertitude. Lorsque l'évaluation de l'incertitude est importante pour la validité ou l'application des résultats d'étalonnage ou d'essai, ou quand une telle exigence figure dans les instructions du client, ou lorsque l'incertitude de mesure affecte le respect de la limite standard, le laboratoire doit impérativement exprimer au mesurande l'incertitude de mesure associée.

1.1. Présentation de la méthode GUM

Selon le guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM) [84], l'incertitude type composé est déterminée sur la base de la loi de propagation de variance. L'incertitude type est évaluée par l'expansion de Taylor du soi-disant modèle de processus mesuré, de sorte que le calcul nécessite la validité d'hypothèses mathématiques. Dans notre exemple, on suppose que le modèle du processus de mesure est linéaire et que la dispersion observée a une distribution symétrique et est comparable par ordre de grandeur. De plus, la distribution de l'amplitude de sortie du modèle suit également l'aspect gaussien qui permet une détermination facile de la valeur du coefficient d'élargissement k.

Le principe de la loi de propagation de l'incertitude est basé sur la dérivée partielle du modèle de processus de mesure par rapport à chacune de ces variables pour déterminer le coefficient de sensibilité. Les hypothèses mathématiques dérivées du modèle compliquent l'application de GUM en milieu industriel, ce qui gênera l'avancement des calculs et entraînera des erreurs importantes. En 2007, le supplément 1 de GUM semblait résoudre ce problème. En effet, les métrologues peuvent également utiliser des outils de simulation numérique (plus précisément, les méthodes numériques de Monte Carlo) pour étaler la distribution des différentes variables qui décrivent le processus de mesure.

1.2. Les étapes de la méthode GUM

a) Définition du mesurande

Selon le GUM, tout résultat de mesure est une variable aléatoire, qui est caractérisée par deux paramètres : un estimateur de l'espérance mathématique de la variable aléatoire dit valeur annoncée « résultat de mesure » et l'incertitude qui est l'estimateur de l'écart type de la variable «

résultat de mesure ». Le mesurande est défini comme une particulière grandeur soumise à mesurage. Baratto [85] a proposé une définition précise et complète de mesurande. Ces interprétations de mesurande indiquent que l'intérêt de la mesure de la grandeur à mesurer est de gagner la connaissance de la valeur réelle des mesurandes, tandis que le GUM a déclaré que l'objectif d'une mesure est de déterminer la valeur réelle de la grandeur à mesurer. Définir le mesurande est une étape essentielle dans le processus GUM.

Ensuite, Si nous désignons par Y le mesurande, on peut modéliser notre processus de mesure sous la forme mathématique suivante : $\mathbf{Y=f\ (X_1,\ X_2,\ \ldots,\ X_n)}$ où $\mathbf{X_1,\ X_2,\ X_n}$ représentent les grandeurs d'entrées. Il est important d'introduire toutes les incertitudes qui figurent dans le modèle proposé. En particulier, des termes correctifs qui permettent de compenser les erreurs systématiques identifiées et aboutir au modèle mathématique le plus complet possible. Cette étape est indispensable avant de passer à l'étape d'évaluation des incertitudes par la loi de propagation. Quant à l'étape de l'écriture mathématique, la quantification des termes à dériver dépend des grandeurs présentes dans le modèle.

Lorsque le mesurande n'est pas aisément modélisable. On pourra faire recours au plan d'expérience afin de déterminer les effets (ai) des facteurs (xi) permettant d'écrire le modèle global Y, comme suite :

$$Y = Moyenne + \sum Effet + \sum intérractions \qquad \text{(Eq 30)}$$

b) Modélisation mathématique du processus de mesure

Modéliser le processus de mesure signifie convertir toutes les informations nécessaires au calcul des résultats de mesure publiés sous forme mathématique

Généralement, le Y mesuré dépend de N grandeurs selon la relation fonctionnelle f, qui relie le mesuré à la grandeur causant l'incertitude du résultat final $Y=f\ (X_1, X_2\ldots.\ , X_n)$.

Les grandeurs d'entrée sont les lectures des instruments ou leurs moyennes, les corrections d'étalonnage, des constantes physiques, etc.

c) La loi de propagation des incertitudes

La loi de propagation des incertitudes nous permet de calculer l'incertitude combinée de y, u_c (y), ou plutôt sa variance $u_c^2(Y)$

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2 u^2(x_i) + 2\times\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=i+1}^{n}\frac{\partial f}{\partial x_i}\frac{\partial f}{\partial x_j}u(x_i,x_j) \qquad \text{(Eq 31)}$$

Où xi et xj sont les estimateurs de Xi et Xj et u (xi, xj) = u (xj, xi) est la variance estimée de xi et xj.

Si on note le degré de corrélation entre x_i et x_j par :

$$r(x_i,x_j) = \frac{u(x_i,x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \qquad \text{(Eq 32)}$$

Où r (xi, xj) est compris entre –1 et +1.

$$u_c^2(Y) = \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]^2 u^2(x_i) + 2\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=1+1}^{n}\left[\frac{\partial f}{\partial x_i}\right]\left[\frac{\partial f}{\partial x_j}\right]r(x_i,x_j)u(x_i)u(x_j) \qquad \text{(Eq 33)}$$

1.3. Evaluation de l'incertitude associée à la valeur corrigée par la méthode GUM

1.3.1. Détermination de l'incertitude type uc

Dans cette partie de mémoire, nous continuerons à déterminer l'incertitude qui survient lors de la mesure sur une machine de mesure 3D. Cette partie présente les incertitudes sur les facteurs d'influences entrant dans le modèle de correction. La correction a été modélisée alors par la droite d'étalonnage dont l'équation est écrite sous la forme :

$$\mathbf{V_c = A_i * V_{lue} + B_i} \qquad \text{(Eq 34)}$$

Le calcul de l'incertitude type de mesure suivant le GUM est décomposé en quatre étapes fondamentales :

a) Spécifier le mesurande

La définition du mesurande repose sur l'écriture d'un modèle mathématique en fonctions des grandeurs d'entrées. On introduit toutes les sources d'erreurs qui influent sur le mesurande et on détermine la valeur de ce dernier. En effet, le mesurande de notre système est : $\mathbf{V_{ci}=A_i*V_{lue}+B_i}$ avec $\mathbf{A_i}$ et $\mathbf{B_i}$ sont respectivement la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite d'étalonnage dans la direction i. Le modèle ne prend jamais pleinement en compte la complexité des phénomènes physiques et comprend souvent des étapes pour simplifier les hypothèses, mais il s'agit d'une étape essentielle dans le processus d'estimation de l'incertitude.

b) Identifier les sources d'erreurs

Toutes les valeurs mesurées ne sont pas exactes et sont toujours liées à des erreurs. Elles proviennent de résultats indiquant une certaine dispersion ou un certain changement. Le résultat de mesure est affecté par une variété de facteurs, qui dépendent du matériau et de ses caractéristiques, du milieu ou de l'environnement où on fait la mesure, des outils ou équipements utilisés pour la surveillance, de la méthode ou du processus de mesure, et bien sûr de l'opérateur.

- **Matière :**

Avant de commencer la mesure, on doit définir la matière de l'élément à mesurer afin de déterminer ses caractéristiques mécaniques et thermiques. La machine de mesure à portique tridimensionnelle de la marque Mitutoyo est utilisée, et sa structure globale est considérée comme un matériau composite d'aluminium, de marbre de granit et de support en acier.

- **Milieu :**

En général, il faut porter une attention particulière à la température ambiante, à l'humidité, à la pression atmosphérique, à la poussière, aux interférences électromagnétiques, au rayonnement et à la puissance, ainsi qu'au bruit et aux vibrations causés par le bruit et le fonctionnement de la machine. Le test est réalisé dans la salle de métrologie de l'Ecole Normale Supérieure de l'enseignement Technique de Rabat. Le laboratoire est régulé à la température à 20 ± 2°C.

- **Moyen :**

La valeur lue sur une machine ou un instrument de mesure n'est correcte que si le même instrument est comparé au préalable à une référence appelée étalon, et cela ne suffit pas pour tirer des conclusions sur la précision de la mesure ! on utilise l'appareil dans des conditions acceptables et on mesure les facteurs qui affecteront les résultats, tels que la résolution de la machine, la longueur du stylet, le diamètre du palpeur et la sensibilité de ce dernier.

- **Main-d'œuvre :**

Le personnel effectuant les mesures dans le laboratoire doit avoir des compétences de mesure, des compétences compétentes et qualifiées. Les qualifications sont basées non seulement sur l'éducation, la formation et l'expérience, mais également sur des tests comparatifs avec du personnel qualifié au moyen de normes mesurables.

La qualification commence par la préparation de l'échantillon, jusqu'à ce que la détermination et l'interprétation des résultats réussissent (parfois) le test, et prêter attention à l'utilisation et à l'entretien corrects de l'équipement de contrôle.

- **Méthode :**

  - Utilisons-nous la méthode directe ou la méthode indirecte par inversion, en substituant ou en retournant ?
  - Le nombre de mesures a-t-il été pris en compte ou la méthode de répétabilité et de reproductibilité a-t-elle été mise en œuvre ? Quelle vitesse et suivant quelle direction d'accostage effectuons-nous les mesures ?

Afin de garantir la qualité des résultats et d'approuver la bonne utilisation de la méthode, il doit y avoir des références ou des normes de contrôle qualité pour vérifier la validité des tests effectués. Les résultats doivent être enregistrés et facilement accessibles pour une inspection et une correction ultérieure. Dans notre cas, nous nous appuyons sur la norme ISO 10360-2 sans dérogation. De plus, pour la mesure de distance, nous utilisons la gamme de mesure suivante :

1) Charger le palpeur depuis le stockage du disque.
2) GA stockage ASCII → ON.
3) Choisir palpeur.
4) Créer un Plan par le palpage de 3points sur le grand plan de la cale soit (P1).

5) Palper ensuite le 2eme plan, soit (P2).
6) Palper ensuite le 3eme plan, soit (P3).
7) Intersection de (P1) et (P2), soit alors la droite (D1).
8) Intersection de (P2) et (P3), soit alors la droite (D2).
9) Aligner un plan de référence (P1) (plan xy).
10) Rappel de la droite D1 et aligner l'axe X.
11) Intersection des deux droites D1 et D2, créer origine
12) Mémoriser le référentiel crée.
13) Mettre CNC en marche.
14) Configurer les facteurs CN (Max 1mm/s).
15) Désactiver la projection.
16) Mesurer des points intermédiaires et puis prendre les points de mesure d'un plan (3points de l'une des faces de la cale).
17) Dégagement du palpeur.
18) Mesurer des points intermédiaires et puis mesurer un point de la 2eme face de la cale et opposée à la face du plan.
19) Calcul de la distance

c) Quantifier les sources

Le choix des distributions pour les grandeurs d'entrée est une étape importante dans la méthode de propagation des distributions par l'approche GUM. Cela nécessite d'avoir une certaine connaissance de la grandeur à laquelle on veut attribuer une loi de probabilité. Chacune des distributions usuelles a une spécificité et s'adapte à différentes informations qui peuvent être disponibles pour une grandeur d'entrée.

Après avoir établi le modèle, l'incertitude liée à ce modèle dépend des coefficients des droites d'étalonnage A_i et B_i suivant la direction i et de la valeur lue. En appliquant la loi de propagation des incertitudes à l'équation du Vc, nous pouvons obtenir les incertitudes composées selon les 7 directions de mesure :

$$u_{vc}^2 = V_{lue}^2 * u_A^2 + A^2 * u_{Vlue}^2 + u_B^2 + 2 * V_{lue} * u(A, V_{lue}) + 2 * V_{lue} * u(A, B) + 2 * A * u(B, V_{lue}) \quad \text{(Eq 35)}$$

– u_{vc} est l'incertitude sur la valeur corrigée.

– u_{Vlue} est l'incertitude sur la valeur lue.

– u (A, V_{lue}), u (A, B), et u (B, V_{lue}) sont les incertitudes sur les coefficients de corrélation entre les paramètres A_i, B_i et V_{lue}

– A_i et B_i sont respectivement les pentes et les ordonnées à l'origine des droites d'étalonnage.

Dans ce cas, on choisit une densité de probabilité à partir de l'information donnée sur la grandeur d'entrée, puis on déduit l'incertitude-type de cette grandeur à partir de l'écart-type de la distribution choisie.

Incertitude sur la valeur lue : u_{vlue}

u_{vlue} dépend essentiellement de la résolution machine et supposé être triangulaire puisque la mesure est effectuée deux fois entre le plan (PL) et le point (PT) donc $\mathbf{u_{vlue}=R/\sqrt{6}}$

Incertitude sur les coefficients A et B : u_A et u_B

Supposons que u_A et u_B ayant des lois de distribution normale et que leurs écarts types sont égaux à la plage divisée par d_2, où d_2 est un coefficient déterminé à l'aide du diagramme de Shewhart, qui est fonction du nombre de mesures n. Pour n=3, on a d_2=1.693, on trouve alors u_A et u_B.

n	A_2	A_3	B_3	B_4	D_3	D_4	d_2	c_4
2	1,880	2,659	0	3,267	0	3,268	1,128	0,798
3	1,023	1,954	0	2,568	0	2,574	1,693	0,886
4	0,729	1,628	0	2,226	0	2,282	2,059	0,921
5	0,577	1,427	0	2,089	0	2,114	2,326	0,940
6	0,483	1,287	0,300	1,970	0	2,096	2,534	0,952
7	0,419	1,182	0,118	1,882	0,076	1,924	2,704	0,959
8	0,373	1,099	0,185	1,815	0,136	1,864	2,847	0,965
9	0,337	1,032	0,239	1,761	0,184	1,816	2,970	0,969
10	0,308	0,975	0,284	1,716	0,223	1,777	3,078	0,973

Tableau 11 : Extrait MTH 2301 Méthodes statistiques de bernard Clement Nov 2002

$$u_A = [\text{Max}(A_{i1}, A_{i2}, A_{i3}) — \text{Min}(A_{i1}, A_{i2}, A_{i3})]/1.693$$

$$u_B = [\text{Max}(B_{i1}, B_{i2}, B_{i3}) — \text{Min}(B_{i1}, B_{i2}, B_{i3})]/1.693$$

U_{A1}	4,79E-06	U_{B1}	8,62E-04
U_{A2}	6,39E-06	U_{B2}	9,26E-04
U_{A3}	6,07E-06	U_{B3}	3,83E-04
U_{a1}	4,79E-06	U_{b1}	8,62E-04
u_{a2}	6,07E-06	u_{b2}	3,83E-04
u_{a3}	4,79E-06	u_{b3}	8,62E-04
u_{a4}	9,59E-07	u_{b4}	6,54E-04

Tableau 12 : Tableau des incertitudes sur les coefficients Ai et Bi suivant les 7 directions

	Calcul de l'incertitude sur le coefficient de corrélation (A, B)				
	125	150	175	200	250
Coef, corr. x	-4,22E-07	-5,07E-07	-5,91E-07	-6,76E-07	-8,45E-07
Coef, corr. y	-5,08E-07	-6,09E-07	-7,11E-07	-8,12E-07	-1,02E-06
Coef, corr. z	-2,86E-07	-3,43E-07	-4,00E-07	-4,57E-07	-5,71E-07
Coef, corr. xy	-4,22E-07	-5,07E-07	-5,91E-07	-6,76E-07	-8,45E-07
Coef, corr. zx	-2,86E-07	-3,43E-07	-4,00E-07	-4,57E-07	-5,71E-07
Coef, corr. yz	-4,22E-07	-5,07E-07	-5,91E-07	-6,76E-07	-8,45E-07
Coef, corr. xyz	7,38E-08	8,86E-08	1,03E-07	1,18E-07	1,48E-07

Tableau 13 : Tableau des incertitudes sur le coefficient de corrélation entre A et B

	Calcul de l'incertitude sur le coefficient de corrélation (A, Vlue)				
	125	150	175	200	250
Coef, corr. x	-1,73E-07	1,28E-07	-8,90E-08	-1,02E-07	-4,72E-07
Coef, corr. y	2,80E-08	-2,69E-07	2,52E-07	-3,59E-07	-2,75E-07
Coef, corr. z	-1,41E-07	2,66E-08	-2,00E-07	-1,61E-07	-4,87E-07
Coef, corr. xy	-1,73E-07	1,28E-07	-8,90E-08	-1,02E-07	-4,72E-07
Coef, corr. zx	-1,41E-07	2,66E-08	-2,00E-07	-1,61E-07	-4,87E-07
Coef, corr. yz	-1,73E-07	1,28E-07	-8,90E-08	-1,02E-07	-4,72E-07
Coef, corr. xyz	1,85E-07	-2,93E-07	-2,59E-07	-2,96E-07	-9,22E-08

Tableau 14 : Tableau des incertitudes sur le coefficient de corrélation entre A et Vlue

	Calcul de l'incertitude sur le coefficients de corrélation (B,Vlue)				
	125	150	175	200	250
Coef, corr. x	3,47E-07	-3,07E-07	-1,20E-07	-1,20E-07	2,26E-07
Coef, corr. y	-3,03E-07	3,47E-07	-3,77E-07	3,47E-07	-8,05E-08
Coef, corr. z	6,49E-08	1,49E-08	1,13E-07	3,68E-08	1,56E-07
Coef, corr. xy	-2,48E-07	1,53E-07	-9,16E-08	-9,16E-08	-3,40E-07
Coef, corr. zx	6,49E-08	1,49E-08	1,13E-07	3,68E-08	1,56E-07
Coef, corr. yz	3,47E-07	-3,07E-07	-1,20E-07	-1,20E-07	2,26E-07
Coef, corr. xyz	2,49E-07	-2,52E-07	-2,49E-07	-2,49E-07	4,09E-08

Tableau 15 : Tableau des incertitudes sur le coefficient de corrélation entre B et Vlue

d) Combinaison des incertitudes types

Après avoir calculé les différentes incertitudes-types, nous avons trouvé que l'incertitude-type du coefficient A_i est de l'ordre de 10^{-6}, et l'incertitude-type du coefficient B_i est de l'ordre de 10^{-4}. Par conséquent, l'ordre de l'incertitude sur les coefficients de corrélation des trois paramètres est de 10^{-8}. On calcule par la suite l'incertitude type sur la valeur corrigée suivant les 7 directions et pour chacune des cales mesurées selon la norme ISO 10360-2 :

Calcul des incertitudes types sur V_c					
Vref (mm)	125mm	150mm	175mm	200mm	250mm
Uvx (mm)	0,00113	0,00119	0,00127	0,00135	0,00153
Uvcy (mm)	0,00129	0,00139	0,00151	0,00163	0,00189
Uvcz (mm)	0,00094	0,00107	0,00120	0,00134	0,00162
Uvcxy (mm)	0,00011	0,00119	0,00127	0,00135	0,00153
Uvcxz (mm)	0,00094	0,00107	0,00120	0,00134	0,00162
Uvcyz (mm)	0,00113	0,00119	0,00127	0,00135	0,00153
Uvcxyz (mm)	0,00078	0,00078	0,00079	0,00079	0,00081
Maximum des incertitudes (µm)			**0,0019**		

Tableau 16 : Tableau des incertitudes type sur la valeur corrigée

1.3.2. Détermination de l'incertitude élargie

Dans la méthode d'évaluation de l'incertitude GUM, il faut annoncer la valeur attribuée à la valeur mesurée Y et l'incertitude élargie U = k. u (y) pour pouvoir définir un intervalle dont les limites sont y-U et y + U. Dans le cas d'une distribution normale, il est possible d'obtenir une confiance à 95% si la valeur du coefficient k correspond à k = 2. Ceci est justifié par l'interprétation du théorème statistique appelé « Théorème central limite » qui affirme que dans le cas où un grand

nombre d'effets indépendants s'ajoutent, la grandeur de sortie suit pratiquement une loi normale. L'incertitude élargie sur la valeur corrigée est alors :

	Calcul des incertitudes élargies sur V_c				
Vref (mm)	125	150	175	200	250
Uvx (µm)	0,0023	0,0023	0,0025	0,0027	0,0030
Uvcy (µm)	0,0025	0,0027	0,0030	0,0032	0,0037
Uvcz (µm)	0,0018	0,0021	0,0024	0,0026	0,0032
Uvcxy (µm)	0,0022	0,0023	0,0025	0,0027	0,0030
Uvcxz (µm)	0,0018	0,0021	0,0024	0,0026	0,0032
Uvcyz (µm)	0,00225	0,00239	0,00254	0,00270	0,00306
Uvcxyz (µm)	0,00156	0,00157	0,00158	0,00159	0,00162
Maximum des incertitudes			**0,0038**		

Tableau 17 : Tableau des incertitudes élargies sur la valeur corrigée

Lors de l'évaluation de l'incertitude sur la valeur corrigée par la méthode GUM. Nous avons essayé d'effectuer des simulations afin de garantir uniquement la façon dont nous avons effectué les calculs, et de ne pas donner des résultats d'incertitude incorrects. Cependant, afin de vérifier notre modèle de correction proposé, nous chercherons les paramètres donnés par la simulation de Monte Carlo, et nous nous basons sur le document supplémentaire GUM 1 pour comparer les deux méthodes, puis nous concluons sur la validité du modèle.

L'évaluation de l'incertitude par la méthode d'analyse GUM est actuellement la méthode la plus largement utilisée pour estimer l'incertitude de mesure en métrologie. Bien qu'approximatif, il convient parfaitement à divers systèmes et modèles de mesure. La méthode GUM est encore très limitée, car dans l'ordre de grandeur réel des sources d'incertitude, les non-linéarités sont rares. Cependant, l'utilisation des méthodes de simulation comme celle de Monte Carlo a été plus encouragée par le Bureau international Poids et Mesures (BIPM) comme une alternative

intéressante à l'approche GUM. Les simulations comptent sur la propagation de la distribution, et non pas sur la propagation des incertitudes comme le GUM, et ne sont donc pas soumises à ses approximations.

2. Évaluation des incertitudes de mesures par l'approche de Monte-Carlo

La deuxième méthode d'évaluation de l'incertitude de mesure est la méthode de Monte Carlo (MCM), qui a été récemment utilisée en métrologie en 2008 et a été formalisée dans le Supplément 1 du GUM, et est également disponible en anglais. JCGM [101 : 2008]. Cette méthode est numérique, c'est-à-dire qu'au lieu d'étaler la variance, nous étalons la distribution. L'avantage de cette méthode est qu'elle ne fait aucune hypothèse sur le modèle étudié et qu'elle est créée pour compléter la méthode analytique (GUM) lorsqu'elle n'est pas applicable. Il permet d'éviter les problèmes non linéaires et d'obtenir directement la distribution de la personne mesurée à partir de la distribution des paramètres d'entrée.

La méthode MCM est un programme numérique qui résout des problèmes mathématiques en simulant des variables aléatoires et est utilisé comme un choix pratique lorsque le cadre d'incertitude GUM n'est pas applicable [86]. Puisque GUM est un déterministe basé sur une combinaison de distributions de probabilités, MCM est un théoricien des probabilités basé sur une simulation numérique d'une combinaison de distributions de probabilités [87].

Wübbeler et al. [88] ont démontré que la méthode de Monte Carlo est un outil fiable et est utilisée lorsque la méthode GUM n'est pas applicable. Par conséquent, la MCM peut être appliqué à n'importe quel modèle et peut gérer des quantités d'entrée non indépendantes.

La tendance dans l'industrie est d'utiliser des méthodes dont la simulation est numérique. Beaucoup de différences de résultats entre le calcul et l'expérimental viennent des incertitudes des données d'entrées. Aussi, il apparaît indispensable de connaître la pertinence des résultats par rapport aux données. Le problème n'est plus de connaître le résultat de calcul pour une configuration, mais d'y ajouter la pertinence du résultat par rapport aux incertitudes des données d'entrées et avoir la possibilité de mieux interpréter les résultats expérimentaux.

C'est avec l'évolution des outils informatiques que les méthodes de simulation sont fréquemment utilisées. On peut simuler des systèmes complexes, associant plusieurs phénomènes physiques couplés et faisant intervenir des échelles caractéristiques variées. Ces progrès

s’accompagnent de la nécessité de fournir une information précise sur le système à simuler (propriétés physiques du milieu, constantes de modélisation...).

Le principe de la simulation Monte Carlo est de changer individuellement le nombre d'entrées du mesurande. Plusieurs techniques de simulation numérique existent, mais nous allons nous intéresser à celle préconisée par le GUM dans son supplément 1 [89].

2.1. Présentation de la méthode MCM

Le principe de cette méthode est assez simple [90]; Le modèle analytique est remplacé par un modèle mathématique entièrement déterministe. En effet, par simulation, l'évaluation du mesurande est perturbée en attribuant une distribution correspondante (principalement la loi de densité de probabilité (uniforme, gaussienne ou arc sinus ...)) à chaque donnée d'entrée.

Actuellement, la documentation sur le sujet est facile à trouver[91]. La technique de Monte-Carlo permet la résolution de certains problèmes numériques complexes où la méthode GUM n’est pas applicable ou lorsqu’on veut valider la méthode GUM.

2.1.1. Estimation des incertitudes selon la MCM

Pour implémenter la méthode Monte Carlo, il faut d'abord définir les facteurs d'influence du facteur mesuré identiquement à la méthode d'analyse GUM. Puis, on affecte à chaque facteur d’influence une distribution statistique. On utilise ensuite un générateur aléatoire pour générer des tirages de chaque facteur d’influence. Le nombre de tirages est essentiel : il doit être infini, ce qui est impossible, il faut donc trouver une combinaison entre le temps de calcul et le temps de réponse. À partir de ces tirages, nous avons calculé les valeurs de sortie correspondantes et synthétisé les résultats de la moyenne, de l'écart type et de l'intervalle de confiance à 95%.

2.1.1.1. Générateur de nombres aléatoires

La qualité du générateur de nombre aléatoire est primordiale dans la méthode numérique MCM afin de préciser les résultats. Cependant, un générateur aléatoire « parfait » n’est pas toujours nécessaire et un générateur pseudo aléatoire pourra souvent être suffisant à condition qu’ils puissent générer des valeurs non corrélées et aient un temps élevé par rapport au nombre de tirages simulé.

Les générateurs de nombres pseudo-aléatoires ont fait de grands progrès ces dernières années grâce à de nouveaux algorithmes, ainsi que grâce aux processeurs des ordinateurs qui sont passés de 32 bits à 64 bits. Le développement des générateurs de nombres aléatoires a un impact bien plus important sur la précision des résultats que sur la vitesse de calcul.

L'utilisation du générateur pseudo-aléatoire nous amène à la simulation Monte Carlo, et l'utilisation du générateur quasi aléatoire nous amène à la simulation quasi Monte Carlo. Les premiers générateurs (pseudo aléatoire) sont les plus faciles à utiliser, puisqu'ils sont supposés produire des nombres vraiment aléatoires qu'on ne peut pas prédire le prochain nombre. Ce type de générateur produit une suite de nombres compris entre 0 et m-1 qui est donc de période m.

En résumé, un bon générateur aléatoire doit remplir les exigences suivantes :

- L'indépendance des nombres générés non corrélés.
- Les tirages sont répartis uniformément sur tout l'intervalle.
- Avoir une très longue période.
- L'efficacité du processus de simulation dans le cas du très grand nombre de fois, il faut que le programme soit le plus simple possible et nécessite peu d'opérations coûteuses en temps de calcul).

2.1.1.2. Calcul des résultats

Après avoir défini toutes les distributions des quantités d'entrée, nous générons 10^n réalisations de chaque quantité d'entrée en traçant leurs fonctions de densité de probabilité. La simulation nous permet d'établir la distribution empirique de l'objet mesuré à partir de la valeur 10^n de la sortie, et de synthétiser les résultats obtenus en notant :

- L`espérance mathématique
- L`écart type
- L`intervalle le plus court au niveau de probabilité spécifiée (généralement 95 %)

La figure ci-dessous est un diagramme schématique simple du principe de la méthode de Monte Carlo utilisé pour estimer l'incertitude de mesure

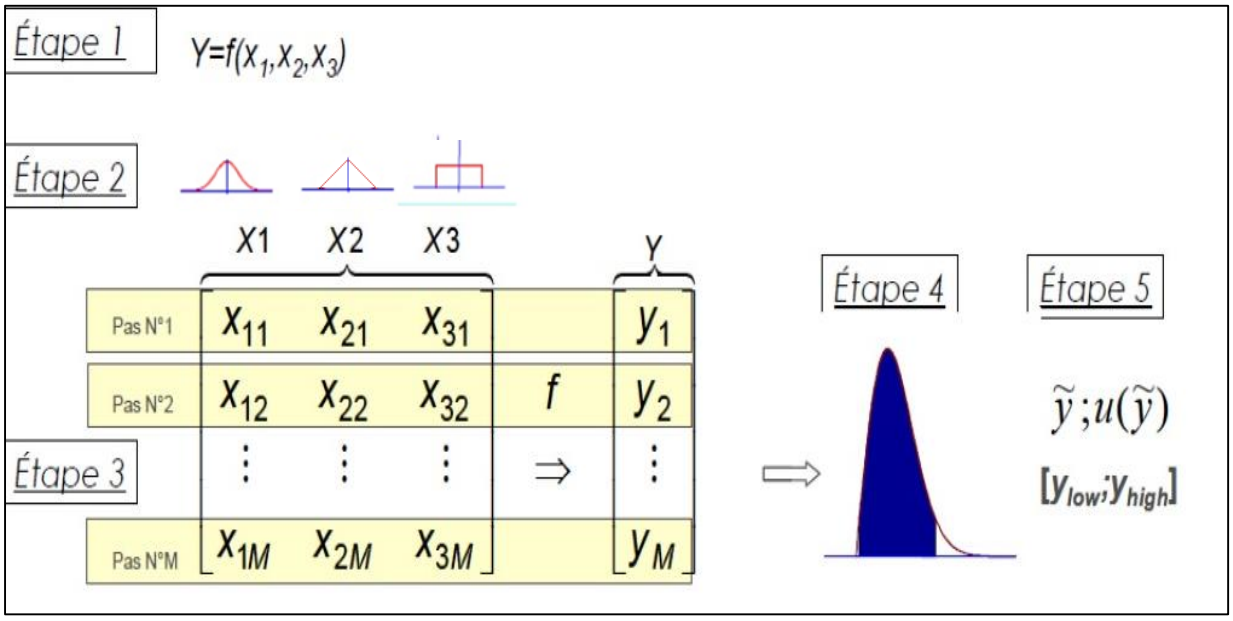


Figure 23 : Schématisation de la méthode MCM pour le calcul des incertitudes

La méthode de Monte Carlo est une méthode pratique de propagation distribuée qui permet de surmonter les difficultés causées par la non-linéarité du modèle, fournissant ainsi une estimation fiable de l'incertitude de mesure. L'approche de Monte-Carlo se propage facilement dans n'importe quelle distribution. Cependant, il faut admettre que cette simulation comporte des limites, notamment celles causées par la puissance de nécessaire qui peut être très importante si on étudie les processus de mesure complexes comprenant plusieurs grandeurs d'entrées.

Grâce à l'évolution des systèmes informatiques, les méthodes de simulation calcul sont généralement conçues pour traiter des systèmes encore plus complexes.

2.2. Application de l'approche de Monte-Carlo sur le modèle de correction

2.2.1. Principe de calcul

L'application de cette approche est simple ; Le modèle analytique est remplacé par une description mathématique complètement déterministe. Le calcul est fait sous le logiciel Mc-Ed qui est avant tout une interface graphique permettant de piloter les logiciels du Pack Monte-Carlo en utilisant l'environnement Windows. Ce logiciel est caractérisé par une interface intuitive ou l'ensemble des grandeurs intervenant dans le modèle de la mesure est présenté de façon synthétique et visuelle dans un tableau qui comporte trois écrans correspondants aux trois grandes

étapes du calcul d'incertitudes : la saisie du modèle et la définition des variables, la génération des échantillons pour les grandeurs d'entrées et de sortie, et enfin les résultats qui sont la moyenne, l'écart-type et l'intervalle de confiance, et les représentations graphiques. Par simulation, on utilise une distribution de nombres aléatoires (uniforme, gaussienne, loi, loi de densité de probabilité uniforme ou arcsin, etc.) pour perturber chaque donnée d'entrée afin d'obtenir une évaluation des mesurandes étudiés. On utilise ensuite un générateur aléatoire pour générer des tirages de chaque facteur d'influence. Le nombre de tirages est une question essentielle : il devrait être infini, ce qui est impossible : Nous chercherons un compromis entre le temps de calcul et la qualité de la densité de probabilité de sortie. Ces graphiques permettent de calculer les valeurs de sortie correspondantes et de synthétiser les résultats. Habituellement, les valeurs obtenues sont la moyenne, l'écart type et l'intervalle de confiance.

2.2.1.1. Choix des distributions pour les grandeurs d'entrée et de sortie

En utilisant l'interface PFS-AC, on introduit le modèle de la mesure, et on affecte les lois aux grandeurs d'entrée. Le choix de ces lois dépend généralement de la nature de la distribution. Lorsqu'un paramètre est soumis à l'influence d'une distribution aléatoire et d'un grand nombre d'échantillonnages, alors l'effet global suit une loi normale. Tandis que, la loi uniforme indique, intuitivement, que toutes les valeurs de l'intervalle ont les mêmes chances d'apparaître c.-à-d. la densité de probabilité est constante. La fonction qu'on cherche à simuler est la matrice de correction suivant les 7 directions exprimées par :

$$\mathbf{Vc=Ai*Vlue+Bi} \quad \textbf{(}\text{Eq } \textit{34}\text{)}$$

Cette fonction dépend de la variable Vlue (Moyenne des mesures) qu'on y affectera une loi triangle, cependant, la variation sur les coefficients des droites d'étalonnage Ai et Bi est normale.

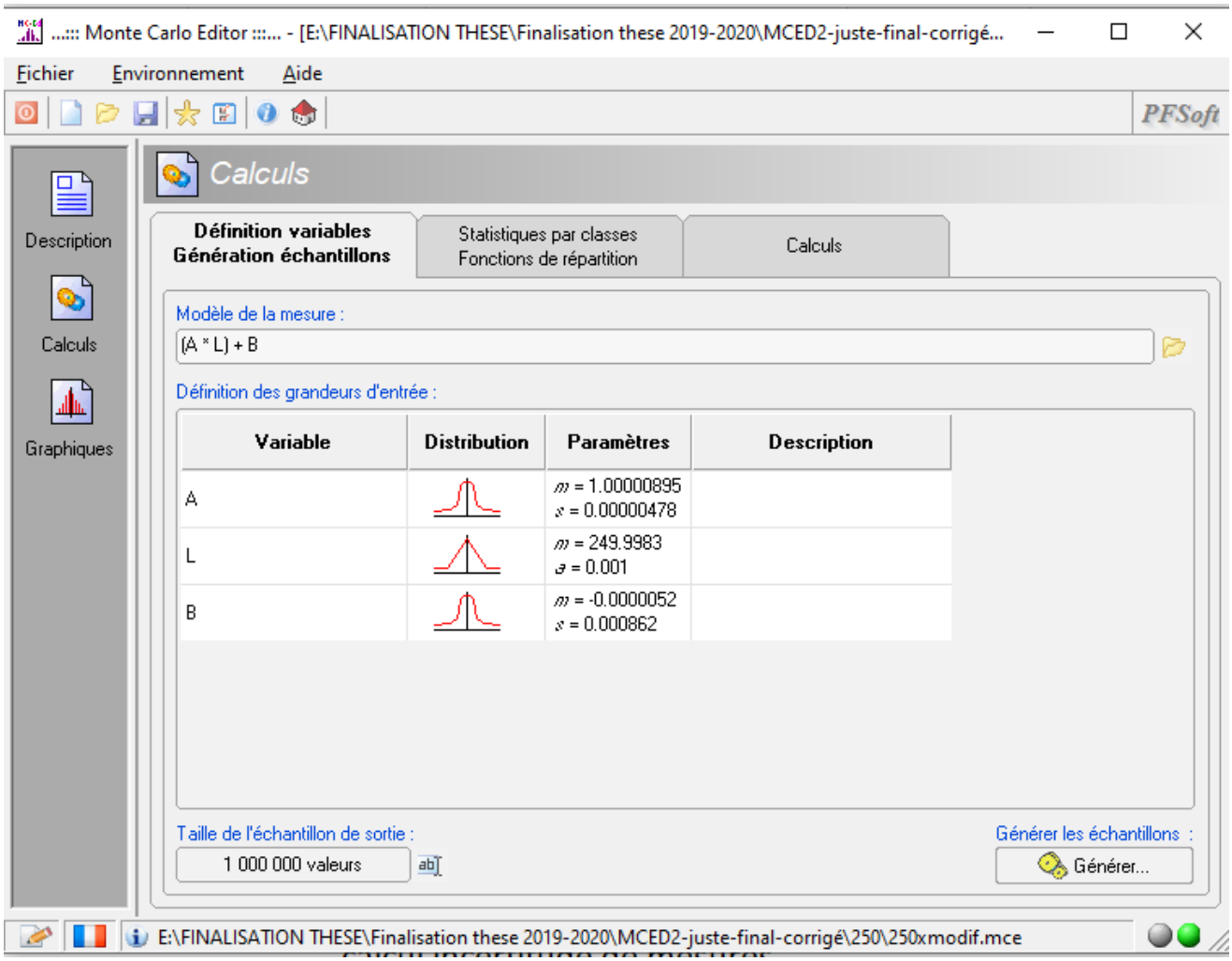


Figure 24: Interface de Mc-Ed (cale de 250mm suivant la direction x)

2.2.1.2. Générateur de nombres aléatoire

Après avoir défini les distributions de toutes les quantités d'entrée, nous pouvons générer les $M = 10^6$ réalisations de chaque quantité d'entrée en utilisant leur fonction de densité de probabilité, il doit donc y avoir un générateur de nombres suffisamment aléatoire. Enfin, il sélectionne la valeur de chaque terme du modèle, son incertitude associée et sa fonction de probabilité.

2.2.1.3. Résultats et interprétations

Les valeurs obtenues sont la moyenne, l'écart type et un intervalle élargi. Cependant, afin d'assurer une meilleure exactitude des résultats, la moyenne et l'écart type sont calculés directement sur les échantillons au moyen de réduction des échantillons alors que l'intervalle de confiance est calculé au moyen d'algorithmes dédiés aux densités de probabilité symétriques ou asymétriques.

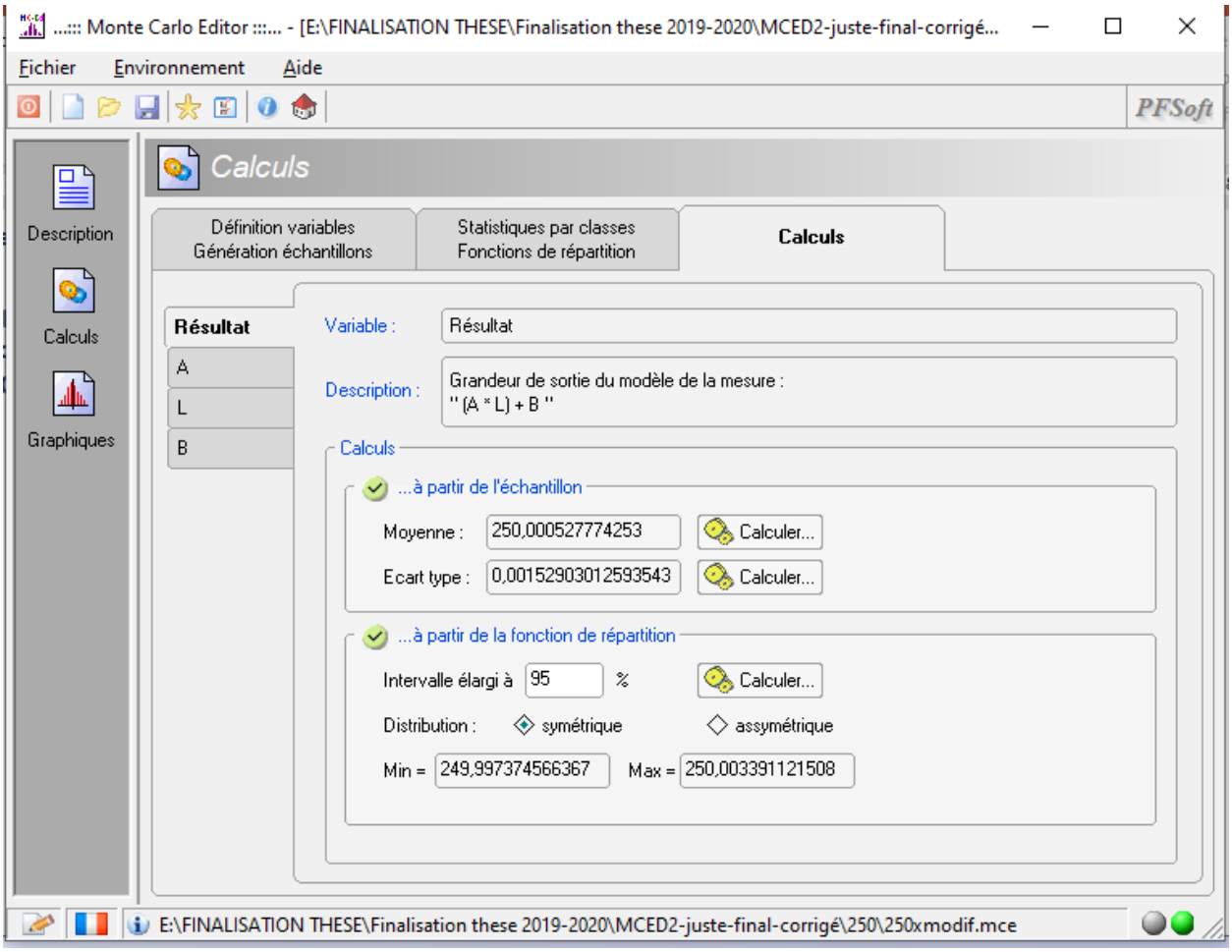


Figure 25 : Les résultats de simulation de MCM

La simplicité du logiciel permet de jongler entre les différents écrans pour avoir accès pendant les calculs aux représentations graphiques de la distribution ci-dessous :

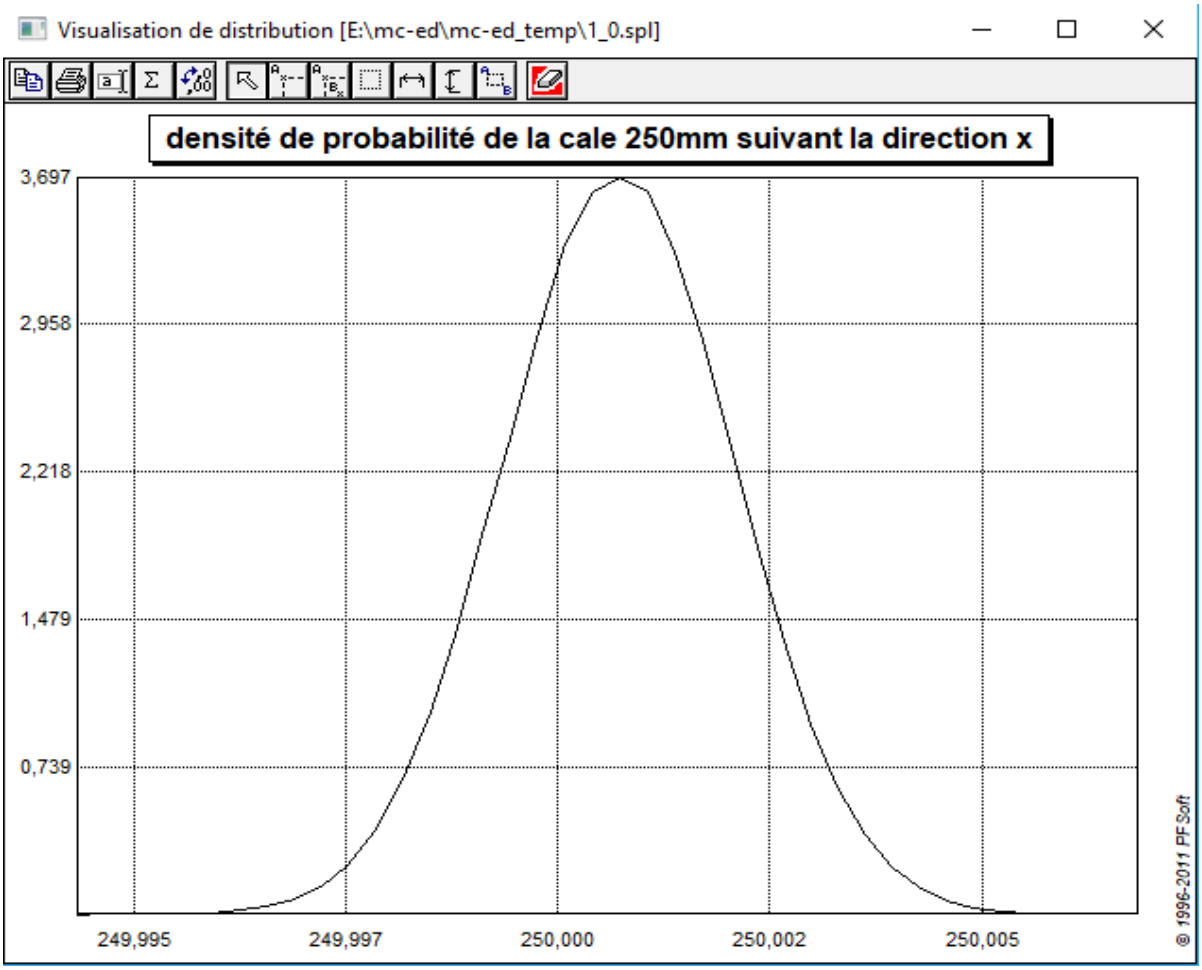


Figure 26: Simulation de l'incertitude de mesure par la méthode de Monté Carlo suivant la direction x et pour la cale 250mm

En particulier, lorsque l'expression analytique du mesurande est très compliquée, il est impossible de calculer la dérive partielle pour déterminer l'incertitude associée. Cependant, la méthode de Monte Carlo résout ce problème. Cela permet d'associer la loi de distribution à chaque grandeur mesurée. Sur la figure 25, nous avons remarqué que nous avons une fonction de probabilité moyenne, qui est égale à la valeur calculée par la méthode analytique. On voit bien l'excellente cohérence de ces deux méthodes : bien que plusieurs entrées soient la loi de la densité de probabilité normale, le résultat final est bien gaussien.

La méthode de Monte Carlo est un outil pratique pour appliquer le principe de propagation des distributions et elle ne repose pas sur les hypothèses limites fournies par la loi de propagation d'incertitude (GUM). Par conséquent, la méthode de Monte Carlo est modifiée pour surmonter la non-linéarité du modèle. Elle peut se propager sans difficulté dans n'importe quelle distribution. Cependant, il faut savoir que cette simulation comporte tout de même des limites, notamment à

cause de la puissance de calcul nécessaire qui peut être très importante dans le cas d'un système complexe avec un grand nombre d'entrées.

En raison du développement de la technologie informatique et logicielle, du développement des fonctions et de la diversité des algorithmes, la méthode de Monte Carlo est devenue plus pratique et devrait continuer à être développée à l'avenir. Les gens peuvent faire face à des systèmes plus complexes basés sur des méthodes de simulation. En outre, le choix des densités de probabilités pour les grandeurs d'entrées du modèle peut être difficile en raison des données inexactes ou à un manque de compréhension des processus physiques sous-jacents. La qualité des résultats de la simulation numérique dépend de la qualité du générateur de nombres aléatoires, mais la plupart des logiciels commerciaux conviennent à cette application.

Tant que la plage de validité de la méthode de Monte-Carlo est plus large que la plage de validité de la méthode d'incertitude GUM, il est recommandé de comparer les deux méthodes. Si cette dernière est plus avantageuse, on peut utiliser le cadre d'incertitude GUM dans ce cas, et il y en aura dans le futur et pour assez de problèmes similaires. Sinon, la méthode de Monte Carlo doit être envisagée. Les résultats sont maintenant complets, ils peuvent donc être discutés dans le paragraphe suivant pour comparer les résultats de l'analyse avec les résultats de la simulation de Monte Carlo. Ensuite, on élargit la portée de la discussion pour se concentrer de manière critique sur la réalisation des avantages, des limites et des améliorations futures des deux méthodes d'évaluation de l'incertitude.

3. Comparaison des deux méthodes d'évaluation des incertitudes de mesures

Le but de cette section est de vérifier le contenu décrit dans le supplément 1 de GUM [89] en comparant les résultats des deux méthodes (avec un intervalle de confiance de 95%). Le tableau suivant résume les résultats des deux méthodes :

		Validation du GUM par MCM				
		125	150	175	200	250
Suivant x	Uvcx GUM élargie	0,0023	0,0024	0,0025	0,0027	0,0031
	Moyenne MCM	124,9997	150,0006	175,0002	200,0004	250,0005
	Ecart type MCM	0,0011	0,0012	0,0013	0,0014	0,0015
	Ylow MCM	124,9973	149,9982	174,9975	199,9976	249,9973
	Yhigh MCM	125,0018	150,0029	175,0025	200,0029	250,0034
Suivant y	Uvcy GUM élargie	0,0026	0,0028	0,0030	0,0033	0,0038
	Moyenne MCM	125,0000	149,9999	175,0006	200,0006	250,0005
	Ecart type MCM	0,0013	0,0014	0,0015	0,0016	0,0019
	Ylow MCM	124,9973	149,9971	174,9975	199,9972	249,9966
	Yhigh MCM	125,0024	150,0025	175,0034	200,0036	250,0040
Suivant z	Uvcz GUM élargie	0,0019	0,0021	0,0024	0,0027	0,0032
	Moyenne MCM	125,0008	149,9994	175,0002	200,0002	250,0009
	Ecart type MCM	0,0009	0,0001	0,0012	0,0013	0,0016
	Ylow MCM	124,9989	149,9972	174,9976	199,9974	249,9976
	Yhigh MCM	125,0026	150,0014	175,0024	200,0027	250,0040
Suivant xy	Uvcxy GUM élargie	0,0023	0,0024	0,0025	0,0027	0,0031
	Moyenne MCM	124,9997	150,0006	175,0002	200,0004	250,0005
	Ecart type MCM	0,0011	0,0012	0,0013	0,0014	0,0015
	Ylow MCM	124,9973	149,9982	174,9975	199,9976	249,9973
	Yhigh MCM	125,0018	150,0029	175,0025	200,0029	250,0034
Suivant xz	Uvcxz GUM élargie	0,0019	0,0021	0,0024	0,0027	0,0032
	Moyenne MCM	125,0008	149,9994	175,0002	200,0002	250,0009
	Ecart type MCM	0,0009	0,0001	0,0012	0,0013	0,0016
	Ylow MCM	124,9989	149,9972	174,9976	199,9974	249,9976
	Yhigh MCM	125,0026	150,0014	175,0024	200,0027	250,0040
Suivant yz	Uvcyz GUM élargie	0,0023	0,0024	0,0025	0,0027	0,0031
	Moyenne MCM	124,9997	150,0006	175,0002	200,0004	250,0005
	Ecart type MCM	0,0011	0,0012	0,0013	0,0014	0,0015
	Ylow MCM	124,9973	149,9982	174,9975	199,9976	249,9973
	Yhigh MCM	125,0018	150,0029	175,0025	200,0029	250,0034
Suivant xyz	Uvcxyz GUM élargie	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016	0,0016
	Moyenne MCM	124,9990	150,0011	175,0002	200,0007	250,0001
	Ecart type MCM	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
	Ylow MCM	124,9974	149,9995	174,9985	199,9990	249,9985
	Yhigh MCM	125,0005	150,0026	175,0017	200,0021	250,0017

Tableau 18: Tableau des résultats GUM et MCM

La méthode proposée consiste à vérifier si l'intervalle de confiance obtenu par la loi de propagation de l'incertitude et celui obtenus par la méthode de Monte Carlo sont cohérents avec l'approximation $\zeta = 0{,}5 * 10^{l.}$. Tout d'abord, nous commençons par déterminer la tolérance δ associée au résultat calculé z. Le résultat est donné par $z = c * 10^{l}$, où c est la valeur du dernier digit considéré comme valide pour z. Ensuite, nous écrirons $\delta = 0.5.10^{l}$, prendrons l'incertitude de la valeur de correction u (y), et ne garderons qu'un seul nombre significatif, c'est-à-dire $n_{dig} = 1$, $u(y) = 2.10^{-3}$ mm. La valeur de tolérance est $\delta = 0{,}5.10\text{-}3$ mm.

La deuxième étape du processus de vérification équivaut à comparer les incertitudes élargies obtenues par chaque méthode. Nous faisons la différence :

$$D_{low} = \left| Y_{lowGUM} - Y_{lowMCM} \right|$$

$$D_{high} = \left| Y_{highGUM} - Y_{highMCM} \right|$$

Si ces écarts sont inférieurs aux tolérances préalablement déterminées, les résultats obtenus par la méthode GUM seront vérifiés. Dans le cas contraire, les résultats obtenus par la méthode MCM doivent être retenus.

		125	**150**	**175**	**200**	**250**
X	D_{low}	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002
	D_{high}	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003	0,0002
Y	D_{low}	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
	D_{high}	0,0002	0,0003	0,0002	0,0002	0,0003
Z	D_{low}	0,0000	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001
	D_{high}	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
XY	D_{low}	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002
	D_{high}	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003	0,0002
XZ	D_{low}	0,0000	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001
	D_{high}	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
YZ	D_{low}	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002	0,0002
	D_{high}	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003	0,0002
XYZ	D_{low}	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001
	D_{high}	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002

Tableau 19 : Les valeurs de D_{low} et D_{high} pour les différentes cales et suivant les 7 directions

On constate que les différences D_{low} et D_{high} sont toutes inférieures ou égales à $\boldsymbol{\delta = 0.5.10^{-3}}$. Par conséquent, la différence entre les deux intervalles de confiance utilisés est d'environ 10^{-4}, et l'intervalle calculé par simulation numérique de Monte Carlo est inclus dans l'intervalle calculé par GUM.

La comparaison entre l'incertitude calculée à l'aide de la méthode d'analyse GUM et les résultats de la simulation numérique Monte Carlo n'a pas montré de différence significative, et c'est grâce à la linéarité du modèle de mesure utilisé et à l'indépendance des paramètres constituant le modèle.

Nous avons comparé l'intervalle de confiance des deux méthodes à 95%, et les résultats sont cohérents entre eux, et pouvons conclure que les résultats donnés par MCM vérifient les résultats donnés par GUM.

Conclusion

Ce chapitre présente la recherche comparative entre les méthodes d'estimation de l'incertitude de mesure sur le modèle de correction d'étalonnage de la machine de mesure tridimensionnelle. Nous introduisons d'abord les différentes méthodes de propagation de l'incertitude, à savoir la méthode GUM et la méthode Monte-Carlo. Ainsi, on a essayé d'estimer cette incertitude selon les deux méthodes.

La méthode analytique (GUM) peut conduire à une analyse complète de l'incertitude, afin de calculer l'incertitude des facteurs d'influence, la sensibilité des facteurs d'influence au changement des paramètres d'entrée, et la correction de la contribution de l'incertitude sur la valeur corrigée. Par contre, l'approche de Monte-Carlo ne se base que sur les lois de distributions affectées à chacune des grandeurs d'entrées. L'avantage de cette méthode est de calculer des dérivées partielles, en particulier lorsque l'objet mesuré a des expressions mathématiques complexes.

Après avoir comparé les résultats, nous avons constaté que l'incertitude trouvée par les deux méthodes est presque la même, avec une différence de 10^{-4}, et que la différence entre les deux intervalles de confiance utilisés est très faible. En suivant les normes décrites dans le supplément 1 du GUM, on peut conclure que le modèle de propagation d'incertitude développé par GUM est valide.

CHAPITRE IV : Validation expérimentale

Introduction

Le chapitre présente la démarche suivie pour la validation de notre modèle et les résultats obtenus. Tout d'abord, nous avons généralisé le modèle de correction développé dans le chapitre précédent sous forme matricielle afin de pouvoir appliquer les corrections sur n'importe quelle mesure et dans n'importe quelle direction. Puis, la méthode de validation retenue suit la démarche préconisée par la norme ISO 10360-2 [59]. Nous procédons par la suite à comparer les valeurs calculées par notre modèle à ceux d'un laboratoire accrédité COFRAC en dimensionnel. Et ce en appliquant le critère de l'écart normalisé développé dans la norme ISO 17043 [92] ce qui nous permettra de confirmer la performance de la méthode proposée.

Par conséquent, nous avons souligné l'impact de l'échantillonnage sur la déclaration de conformité. Nous avons prouvé que les conditions d'échantillonnage doivent être vérifiées pour le contrôle final effectué par le fournisseur ou le contrôle de réception effectué par le client. Cette méthode d'évaluation des risques a été introduite à l'origine pour déclarer sa conformité et prendre des décisions sans risque dans l'ISO / CEI 17025-2017 [83] et la norme ISO 98-4 [93].

1. Modélisation de la position de la cale étalon dans l'espace de mesure

1.1. Position nominale de la cale étalon dans le volume de mesure de la MMT

La **i^éme** position de la cale étalon dans le volume de mesure de la MMT est définie par les deux angles α_i et β_i et la valeur lue de la cale comme indiqué dans la figure ci-dessous :

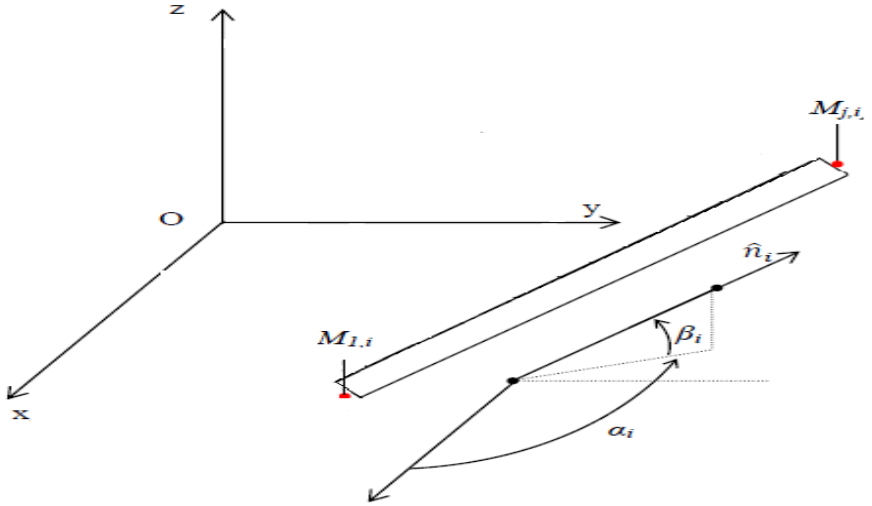


Figure 27 : Position i de la cale étalon dans le volume de mesure de la MMT

Le vecteur position $\overrightarrow{M_{1,i}M_{j,i}}$ est défini par :

$$\overrightarrow{M_{1,i}M_{j,i}} = \left\|\overrightarrow{M_{1,i}M_{j,i}}\right\|.\overrightarrow{n_i} \qquad \text{(Eq 36)}$$

Avec :

$$\vec{n}_i = \begin{pmatrix} \cos(\beta_i)\cos(\alpha_i) \\ \cos(\beta_i)\sin(\alpha_i) \\ \sin(\beta_i) \end{pmatrix} \quad \text{(Eq 37)}$$

$\left\| \overrightarrow{M_{1,i} M_{j,i}} \right\|$ est la distance conventionnellement vraie entre les deux points $\mathbf{M_{1,i}}$ et $\mathbf{M_{j,i}}$.

1.2. Système d'identification

Le principe consiste à modéliser cette valeur corrigée dans une position i de l'espace et l'écrire sous forme matricielle en fonction des valeurs lues suivant les axes de la machine (x, y et z).

Dans un premier lieu, nous avons modélisé par une interpolation linéaire les valeurs lues. Les équations de cette modélisation vont participer par la suite à la contribution de la matrice de correction globale qui va servir pour l'étalonnage de notre machine à mesurer tridimensionnelle

Tout d'abord, nous avons écrit les valeurs corrigées sous la forme de l'équation d'une droite dont les coefficients (la pente et l'ordonnée à l'origine) sont déterminés en fonction des mesures effectuées. Ensuite, nous appliquons les corrections obtenues à partir des mesures aux 7 positions recommandés par la norme ISO 10360.2. Ensuite, en projetant chaque point de la droite sur les 3 axes du repère, nous utilisons cette matrice pour définir la position de chaque point mesuré dans l'espace machine.

$$J = \begin{bmatrix} A_x \cos\alpha\cos\beta & 0 & 0 & B_x \cos\alpha\cos\beta \\ 0 & A_y \sin\alpha\cos\beta & 0 & B_y \sin\alpha\cos\beta \\ 0 & 0 & A_z \sin\beta & B_z \sin\beta \end{bmatrix} \quad \text{(Eq 38)}$$

En utilisant l'expression matricielle de la valeur corrigée, nous pouvons écrire une expression générale de la valeur corrigée. Pour la position (i) de la cale étalon, la valeur corrigée de la valeur mesurée de la cale est la projection de la valeur mesurée expérimentalement. Pour cette distance, la valeur est :

$$V_{c/i} = (J^t * n_i)^t * V_{lue/i} \quad \text{(Eq 39)}$$

Avec :

$$V_{lue} = \begin{bmatrix} V_{lue/x} \\ V_{lue/y} \\ V_{lue/z} \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{(Eq 40)}$$

- J est la matrice associée aux projections selon l'angle de mesure.
- V_{lue} est la valeur lue suivant les 3 directions (x, y et z).
- A_x, A_y, et A_z, B_x, B_y, et B_z sont respectivement les pentes et les ordonnées de la droite d'étalonnage.

La pièce étalon est mesuré à 7 positions. Pour chaque position, nous mesurons 5 cales. Le test expérimental a été réalisé sur une machine Mitutoyo C544 installée dans la salle de métrologie de l'Ecole Normale Supérieure de l'enseignement technique de Rabat.

Les cales utilisées sont de type Acier et de longueurs nominales **125mm**, **150mm**, **175mm**, **200mm**, et **250mm**. L'étalonnage de ces pièces étalons est effectué sur la machine Mitutoyo, ayant la spécification E = 4 µm + 5 * L / 1000 suivant les 7 positions prédéfinies selon la norme ISO 10360-2.

1.3. Résultats de mesure et d'identification

A l'aide du logiciel **Matlab**, on a pu réaliser un programme pour calculer les valeurs corrigées par la matrice de correction proposée. Ensuite on a entamé la comparaison des valeurs corrigées avec les valeurs conventionnelles des cales avec l'incertitude de correction associée.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs corrigées par la matrice de correction proposée

	Matrice de correction				
	125,00004	150,0004	175,00006	200,0006	250,0006
Suivant x	124,9998	150,0006	175,0003	200,0005	250,0005
Suivant y	125,0001	150,0003	175,0013	200,0015	250,0019
Suivant z	125,0011	150,0000	175,0009	200,0011	250,0022
Suivant xy	124,9998	150,0006	175,0003	200,0005	250,0005

Suivant xz	125,0011	150,0000	175,0009	200,0011	250,0022
Suivant yz	124,9998	150,0006	175,0003	200,0005	250,0005
Suivant xyz	124,9998	150,0019	175,0013	200,0018	250,0015

Tableau 20 : Résultats d'étalonnage, suivant les 7 directions réalisé, sur MMT

Si on trace la courbe des valeurs corrigées en rajoutant l'incertitude associée et les deux limites Vref+EMT et Vref -EMT :

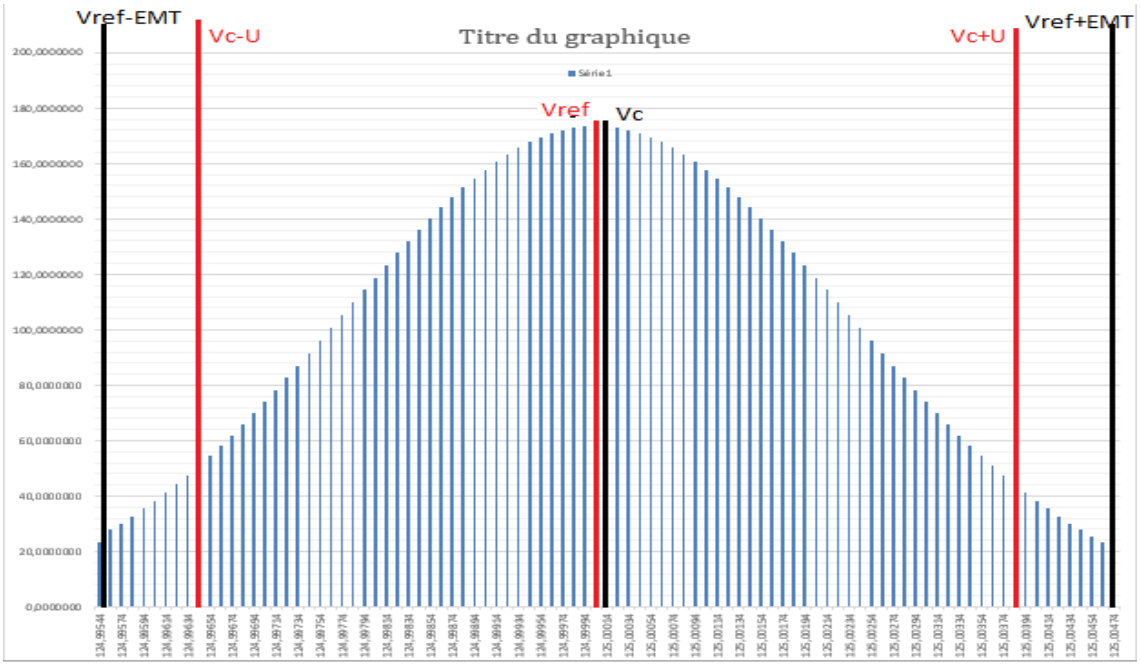


Figure 28 : Densité de probabilité de la valeur corrigée associée à la valeur conventionnelle 125 suivant la direction xyz

Dans le schéma ci-dessus, nous cherchons à démontrer toutes les valeurs corrigées par la matrice de correction présentées par la courbe en bleu et suivant bien évidemment l'ensemble des directions (7 directions). Après calcul et compte tenu de l'incertitude de l'interpolation pertinente, les résultats rentrent dans l'intervalle **[V_{ref} - EMT, V_{ref} + EMT]**, ainsi la matrice devient systématiquement valide pour les 5 cales étalons, et pourrait par la suite être appliquée sur d'autres machines à mesurer tridimensionnelles jouissant des mêmes fonctionnalités (les machines portiques), ce qui permettra d'atteindre l'objectif souhaité celui de la déclaration de conformité par rapport aux spécifications exigées par la norme.

1.3.1. Calcul de l'erreur modèle

En introduisant la valeur corrigée par la matrice de correction proposée et la valeur conventionnelle, on cherche à calculer l'erreur de modèle correspondant à la valeur absolue de la différence entre la valeur corrigée du modèle et la valeur de référence. Les valeurs des erreurs modèles sont :

	Erreur modèle Em=Abs (V_{ref} - $V_{corrigé}$ par la matrice)				
	125,0000	150,0004	175,0001	200,0006	250,0006
E_{mx}(µm)	0,24	0,20	0,24	0,10	0,10
E_{my}(µm)	0,06	0,10	1,24	0,90	1,30
E_{mz}(µm)	1,06	0,40	0,84	0,50	1,60
E_{mxy}(µm)	0,24	0,20	0,24	0,10	0,10
E_{mzx}(µm)	1,06	0,40	0,84	0,50	1,60
E_{myz}(µm)	0,24	0,20	0,24	0,10	0,10
E_{mxyz}(µm)	0,24	1,50	1,24	1,20	0,90
EMT/3 (µm)	1,54	1,58	1,63	1,67	1,75

Tableau 21 : Les erreurs modèles entre la valeur corrigée par matrice de correction et la valeur de référence

En dressant ce tableau, nous avons modélisé la matrice, pour vue de pouvoir déterminer les écarts situés entre la valeur de référence et la valeur corrigée par le modèle et suivant bien évidemment l'ensemble des directions (7 directions), ces valeurs-ci une fois calculées, sont toutes inferieures à l'écart maximal toléré divisé par 3. Ainsi en respectant la condition de conformité, la matrice devient systématiquement valide pour les 5 cales étalons, et pourrait par la suite être appliquée dans d'autres machines à mesurer tridimensionnelles jouissant des mêmes fonctionnalités (les machines portiques), ce qui va nous permettre d'atteindre notre objectif qu'on a fixé et qui est la conformité totale de la machine par rapport aux mesures faites.

1.3.2. Calcul de l'incertitude associée au modèle proposé

Si on applique la méthode GUM à la matrice de correction globale développé précédemment, on trouve que l'incertitude lié à cette matrice dépend de plusieurs facteurs (l'angle d'inclinaison de la cale étalon, les coefficients Ai et Bi des droites d'étalonnage, ainsi que la Valeur lue et de la valeur conventionnelle. Cette incertitude est donnée sous la forme :

$$\mathbf{U_c=\sqrt{(U_x\text{^}2+U_y\text{^}2+U_z\text{^}2)}} \qquad \text{(Eq 41)}$$

Sachant que :

$$U_x=\left[U_{A_x}^2 V_{lue_x}^2+U_{B_x}^2+U_{Vlue_x}^2 A_x^2\right]\left[\cos^2\alpha.\cos^2\beta\right]+\left[A_x V_{lue_x}+B_x\right]^2\left[\sin^2\alpha.\cos^2{}_\beta U_{\cos\alpha}^2+\sin^2_\beta.\cos^2{}_\alpha U_{\cos\beta}^2\right]$$

$$U_y=\left[U_{A_y}^2 V_{lue_y}^2+U_{B_y}^2+U_{Vlue_y}^2 A_y^2\right]\left[\sin^2\alpha.\cos^2\beta\right]+\left[A_y V_{lue_y}+B_y\right]^2\left[\cos^2\alpha.\cos^2{}_\beta U_{\sin\alpha}^2+\sin^2_\beta.\sin^2{}_\alpha U_{\cos\beta}^2\right]$$

$$U_z=\left[U_{A_z}^2 V_{lue_z}^2+U_{B_z}^2+U_{Vlue_z}^2 A_z^2\right]\left[\sin^2\beta\right]+\left[A_z V_{lue_z}+B_z\right]^2\left[\cos^2{}_\beta U_{\sin\beta}^2\right]$$

Prenons par exemple la cale de **125mm**, l'incertitude type composée est : $\mathbf{U_c = 1.16\mu m}$

Le coefficient d'élargissement qui permet d'obtenir une incertitude élargie avec un intervalle de confiance de **95 %** est k=2 : U=k*Uc= **2.33 µm**.

Le tableau ci-dessous présente les différentes incertitudes composées et élargies des 5 cales mesurées :

	Incertitude globale de la matrice de correction				
	125mm	150mm	175mm	200mm	250mm
U_{vcx} (µm)	1.126	1.194	1.270	1.351	1.530
U_{vcy} (µm)	0.302	0.302	0.301	0.302	0,302
U_{vcz} (µm)	6,87E-12	6,88E-12	6,88E-12	6,89E-12	6,88E-12
U_c (µm)	1.166	1.232	1.305	1.385	1.560
U (95 %) (µm)	2.332	2.463	2.610	2.770	3.121

Tableau 22 : Les incertitudes type et élargies associées à la matrice de correction

2. Comparaison inter-laboratoires

Les comparaisons inter-laboratoires sont utilisées à de nombreuses fins et l'utilisation internationale est en augmentation. Les objectifs typiques des comparaisons inter-laboratoires comportent comprennent :

a) Évaluation des performances du laboratoire pour des tests ou mesures spécifiques, et surveillance de la maintenance des performances du laboratoire ;
b) Identifier les problèmes dans le laboratoire et prendre des mesures d'amélioration qui peuvent être liées, par exemple, aux procédures d'essai ou de mesure, à l'efficacité de la formation du personnel ou à un étalonnage incorrect de l'équipement ;
c) Déterminer la validité et la possibilité de comparer des méthodes d'essai ou de mesure ;
d) Améliorer la confiance des clients du laboratoire ;
e) Déterminer les différences entre les laboratoires ;
f) Formation des laboratoires participants sur la base de ces résultats de comparaison ;
g) Vérification de la déclaration d'incertitude ;
h) Évaluation des caractéristiques de performance d'une méthode, généralement décrite comme un essai inter-laboratoires ;
i) Attribuer des valeurs aux matériaux de référence et évaluer leur aptitude à des mesures spécifiques ou à des procédures d'essai ;
j) Aider les agences nationales de métrologie à déclarer l'équivalence métrologique au moyen de « comparaisons clés » et d'autres comparaisons effectuées au nom du Bureau international des poids et mesures (BIPM) et des institutions régionales de métrologie compétentes.

Une comparaison inter-laboratoires permet de surveiller et de valider la qualité des résultats. Cette comparaison implique plusieurs laboratoires i. Elle est définie et mise en œuvre pour permettre aux laboratoires d'évaluer et de démontrer leurs performances dans des secteurs déterminés d'essais, d'étalonnages ou de mesurages. La participation à ces comparaisons permet de situer les performances de chaque laboratoire par rapport à celles de la profession traitant d'un type d'échantillon analogue. Enfin, une comparaison inter-laboratoires permet de valider l'incertitude d'une méthode de mesure appliquée par les participants.

Il existe plusieurs types d'objectifs pour la comparaison entre les laboratoires, y compris l'évaluation des performances du laboratoire pour des tests, l'étalonnage ou des mesures spécifiques, et le suivi du maintien de ses performances. Identifier les problèmes dans le laboratoire et prendre des mesures d'amélioration, par exemple, cela peut impliquer des procédures de test ou d'étalonnage, l'efficacité de la formation du personnel ou un étalonnage incorrect de l'équipement.

Il arrive qu'on soit amené à valider une méthode proposée par des comparaisons qui consistent à réaliser des essais sur des échantillons semblables et à en comparer les résultats. L'objectif principal de ces comparaisons est la comparaison entre laboratoires, dont le but est de vérifier la méthode d'essai et de déterminer l'incertitude des résultats correspondants en déterminant l'écart type de répétabilité et de reproductibilité ; déterminer les caractéristiques du produit à utiliser comme une norme de référence et évaluer la fiabilité des résultats des laboratoires participants.

Les normes ISO / CEI 17043 [92] et ISO 15328 [94], impliquant des comparaisons d'évaluation en laboratoire entre laboratoires, indiquent clairement que même dans les laboratoires ayant de bonnes pratiques, tant qu'il y a du personnel compétent, des tests anormaux peuvent être obtenus. Par conséquent, les résultats des comparaisons interlaboratoires ne doivent pas être utilisés pour condamner les participants. Ils doivent être utilisés comme alarmes pour déclencher des enquêtes sur la cause des écarts et prendre des mesures correctives si nécessaire.

Dans de nombreux cas, la décision des laboratoires de participer à la comparaison entre laboratoires repose sur le respect des exigences des normes de certification, en particulier la norme ISO / CEI 17025 [83]. A l'issue de la participation, le laboratoire est responsable de l'analyse des résultats d'évaluation contenus dans le rapport de comparaison interlaboratoires reçu. Il existe plusieurs risques de mal comprendre ces résultats, limitant ainsi les avantages que les participants auraient pu retirer de leur participation. Ce malentendu est généralement dû à une compréhension insuffisante de la méthode utilisée pour arriver à un seul résultat et de la signification de l'alerte.

En bref, trois objectifs différents peuvent être recherchés :

- Valider une méthode d'essais et déterminer l'incertitude des résultats correspondants, par la détermination des écarts-types de répétabilité et de reproductibilité ;
- Déterminer les caractéristiques d'un produit pour son utilisation comme étalon de référence ;

- Evaluer la fiabilité des résultats des laboratoires participants

2.1. Pourquoi participer à une comparaison inter-laboratoires ?

❖ Parce que des erreurs dans les résultats des tests peuvent avoir des conséquences graves et sont très coûteuses. Que les résultats des tests de laboratoire soient utilisés pour vérifier la qualité du produit ou la capacité du processus, ou pour vérifier la conformité réglementaire, toute erreur peut avoir des conséquences extrêmement graves.

Par conséquent, pour un laboratoire indépendant, fournir des résultats de test non fiables nuira à sa réputation et à la confiance de ses clients. Il peut les perdre définitivement. Pour le producteur, fournir des résultats de test non fiables l'exposera à des produits non qualifiés sur le marché, ou peut l'amener à obtenir une qualité trop élevée (en fonction de la mauvaise direction du résultat « essai »). Dans tous les cas, cela réduit la confiance des clients, réduit la réputation de l'organisation et entraîne des coûts supplémentaires associés à la livraison de produits non conformes, des risques juridiques liés à la responsabilité du produit ou au non-respect de la réglementation. Tout cela explique pourquoi la participation à des comparaisons interlaboratoires est essentielle pour évaluer les capacités des laboratoires et pour être accrédité selon la norme 17025 [83] ainsi que toutes ces raisons.

Toutes les causes d'impact significatif seront évaluées à l'échelle mondiale :

- ✓ Compréhension insuffisante des méthodes de test,
- ✓ Compréhension inadéquate ou exécution inadéquate ;
- ✓ Équipements de test ou consommables insuffisants ou inappropriés ;
- ✓ D'un mauvais traitement des données.

Parce que la comparaison entre ces laboratoires fournit les informations suivantes en déterminant l'incertitude de mesure :

- ✓ De l'écart type de répétabilité et de reproductibilité ;
- ✓ Biais de laboratoire, toutes sources d'incertitude, connues ou inconnues.
- ✓ En outre, les participants peuvent être tenus de déclarer leur incertitude.

Toutes ces informations nous permettent de :

- ✓ Indiquer à chaque participant que son incertitude estimée se situe dans la plage inférieure, moyenne ou supérieure de l'incertitude estimée par d'autres laboratoires Par conséquent, chaque participant peut vérifier si son incertitude estimée est cohérente avec la précision de son équipement et les capacités de son personnel.

❖ Parce que nous devons être totalement assurés de la fiabilité des résultats des tests et que les résultats soient utilisés en interne ou vendus, nous devons être totalement assurés des résultats des tests qui nous sont fournis. Dans la plupart des cas, les performances du laboratoire sont évaluées par la précision et la répétabilité des résultats de mesure. La fiabilité de toute évaluation des performances du laboratoire par comparaison interlaboratoires dépend de :

- ✓ La stabilité et l'homogénéité des échantillons utilisés ;
- ✓ L'applicabilité et la robustesse de la technologie statistique utilisée dépend des exigences techniques et du nombre de participants liés aux méthodes d'essai pertinentes ;
- ✓ De toutes les reliques culturelles, en particulier les arrondis indésirables.

2.2. Evaluation de la performance de la méthode de correction par Comparaison inter-laboratoires

Notre objectif est d'évaluer les performances de notre méthode d'étalonnage proposée. L'évaluation comprend la mesure de l'entraxe (la distance entre deux centres de cercle sur la pièce étalon) sur notre machine de mesure 3D, et les résultats obtenus par notre logiciel seront corrigés par la matrice de correction recommandée. Ce même entraxe est mesuré dans le laboratoire Air Métrologie (Accrédité COFRAC) par une machine de mesure optique. Le laboratoire a été créé en Décembre 2007, (Ex : AIR LIQUIDE) sous forme de SARL, ses prestations d'étalonnage et/ou d'essais multi-grandeurs et multi-techniques offrent aux clients les moyens dont elles ont besoin, pour garantir la traçabilité de leurs mesures et surveiller la qualité de leurs moyens.

2.2.1. Mesurer l'entraxe sur la machine MMT (ENSET-RABAT)

Pour mesurer la distance entre les deux centres des deux alésages de notre pièce, nous avons utilisé la programmation CNC pour pouvoir préciser nos mesures (figure ci-dessous).

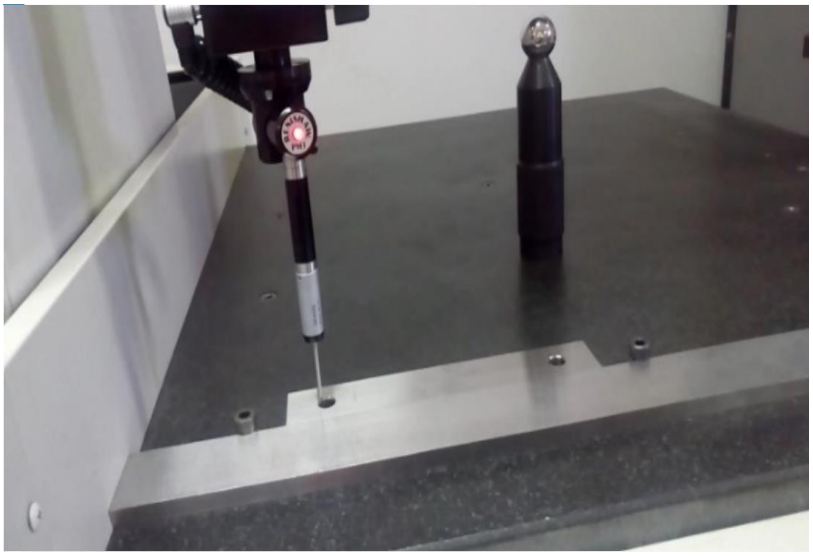


Figure 29 : Montage de la pièce à contrôler sur marbre de la machine à mesurer tridimensionnelle (ENSET-RABAT)

Tout d'abord on commence par identifier sur notre machine à mesurer tridimensionnelle un système de coordonnées défini par les axes de déplacement de la machine auquel on associe un repère machine et un repère de mesure permettant de prendre en compte les changements de repères dus à la diversité des palpeurs utilisés.

- Repère machine : est constitué des 3 directions définies par les directions générales des 3 guidages de la machine. L'origine du système d'axes est définie par les 3 origines fixées par construction sur chacune des 3 règles de mesure. C'est dans ce repère machine que sont exprimées les valeurs X_c, Y_c, Z_c des 3 compteurs mesurant les déplacements de la machine.

- Repère de mesure est le repère qu'on crée par l'intersection des directions constituées par la mesure des éléments géométriques de base. Ce repère permet la mesure des surfaces à palper nécessitant l'utilisation successive de nombreux palpeurs aux dimensions et aux orientations différentes. La pointe du stylet du palpeur est généralement sphérique et le point de contact entre le stylet et la pièce à usiner peut-être n'importe quel point sur la surface sphérique du stylet. Le point de contact de la partie stylet est inconnu lors de la mesure du point, nous utilisons la lecture de trois informations : les coordonnées du centre de la boule sphérique, la direction d'approche et le rayon du stylet. Ces informations sont utilisées pour estimer le point de contact stylet-pièce.

Les coordonnées des points saisis sont exprimées dans un même repère défini par une opération d'étalonnage.

2.2.1.1. Gamme de mesurage de l'entraxe

1) Etalonner le diamètre et la position du palpeur 1 en mesurant la surface de référence et en calculant le centre de la boule du stylet pour qu'il coïncide avec le centre de la boule de référence fixée sur le plateau de la machine. Le palpeur doit être suffisamment long pour atteindre n'importe quel point de la surface à mesurer.
2) Gestion de fichier ASCII.
3) Création du référentiel : Le système de référence peut être créé en mesurant le plan (PL1) en 3 points (le plan de marbre adjacent à la surface de la pièce) et l'intersection de deux droites (DR1 et DR2) perpendiculaires et appartenant à la pièce contrôlée. L'une des deux droites est définie comme un axe pièce et leur intersection comme origine du référentiel O.
4) Mémorisation du référentiel.
5) CNC Marche.
6) Définition d'un point intermédiaire à 10 mm de la pièce.
7) Mesure de 6 points du 1er alésage (CY1).
8) Affichage des résultats : X=-25.017, Y=-17.473, Z=0
9) Remonter le palpeur à la position intermédiaire
10) Déplacement du palpeur de 50mm à droite.
11) Mesure de 6 points du 2ème alésage (CY2)
12) Affichage des résultats : X=-175.588, Y=-17.368, Z=0
13) Mesure de la distance DI= CY1CYL2
14) Fin programme.

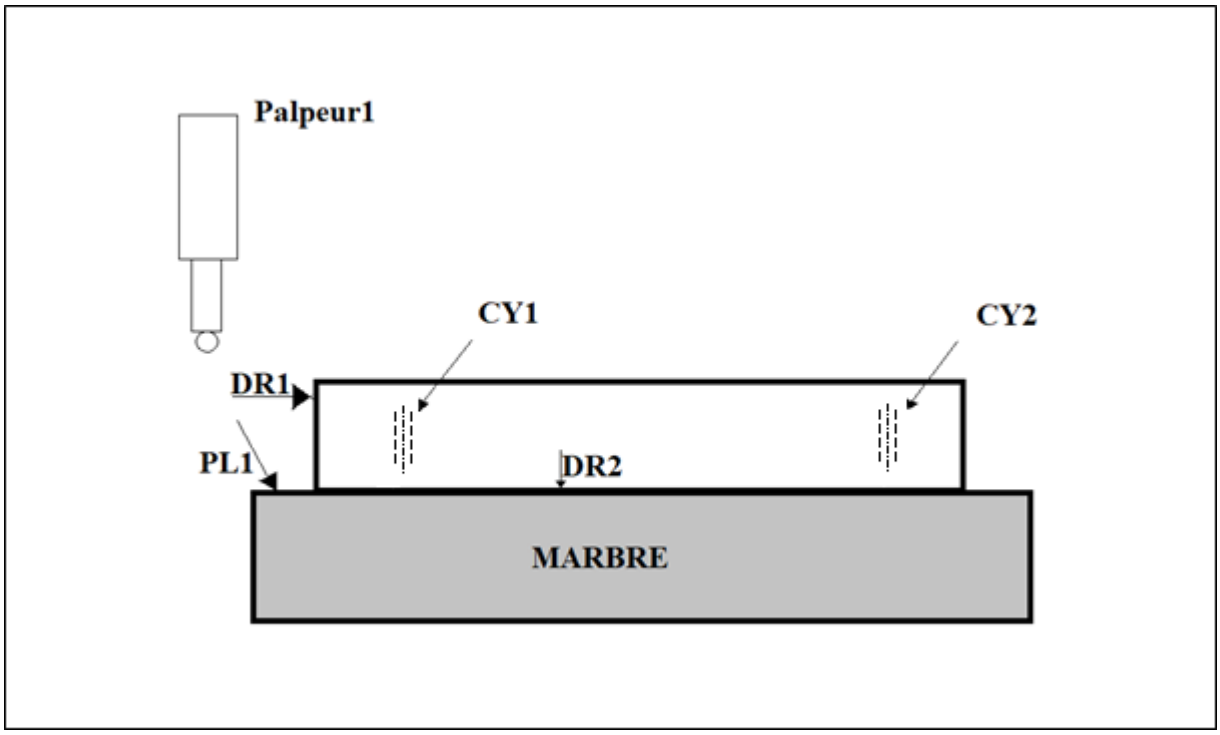


Figure 30 : Définition des éléments géométriques mesurés sur la pièce à contrôler

2.2.1.2. Calcul de l'incertitude associée de la valeur mesurée

Le calcul de l'incertitude élargie associée par la méthode GUM définie dans la partie précédente nous donne :

$$U_e = 2 * Uc$$

$$Ue = 2 * \sqrt{(Ux^2 + Uy^2 + Uz^2)}$$

$U_e = 2.46$ µm

2.2.2. Mesure de l'entraxe au laboratoire AirMetrologie

2.2.2.1. Mesure de l'entraxe par la machine optique TESA

Nous avons essayé de mesurer le même entraxe par une machine de mesure sans contact. Cette machine est dotée d'un mécanisme particulièrement soigné. La table est usinée avec précision et le système de mesure optique TESA est garant de conditions métrologiques optimum et d'une grande fiabilité. Des éclairages variés pour une mesure précise. La TESA-VISIO 300 GL est équipée d'un double éclairage annulaire d'angles d'incidence différents (90° et 45°).

En vue de mesurer l'entraxe, nous avons mesurer les deux distances D_1 et D_2, Voir figure ci-dessous :

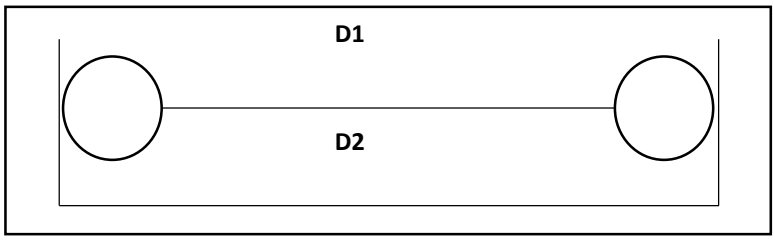


Figure 31 : Définition des distances à mesurer sur la machine optique de AirMterology

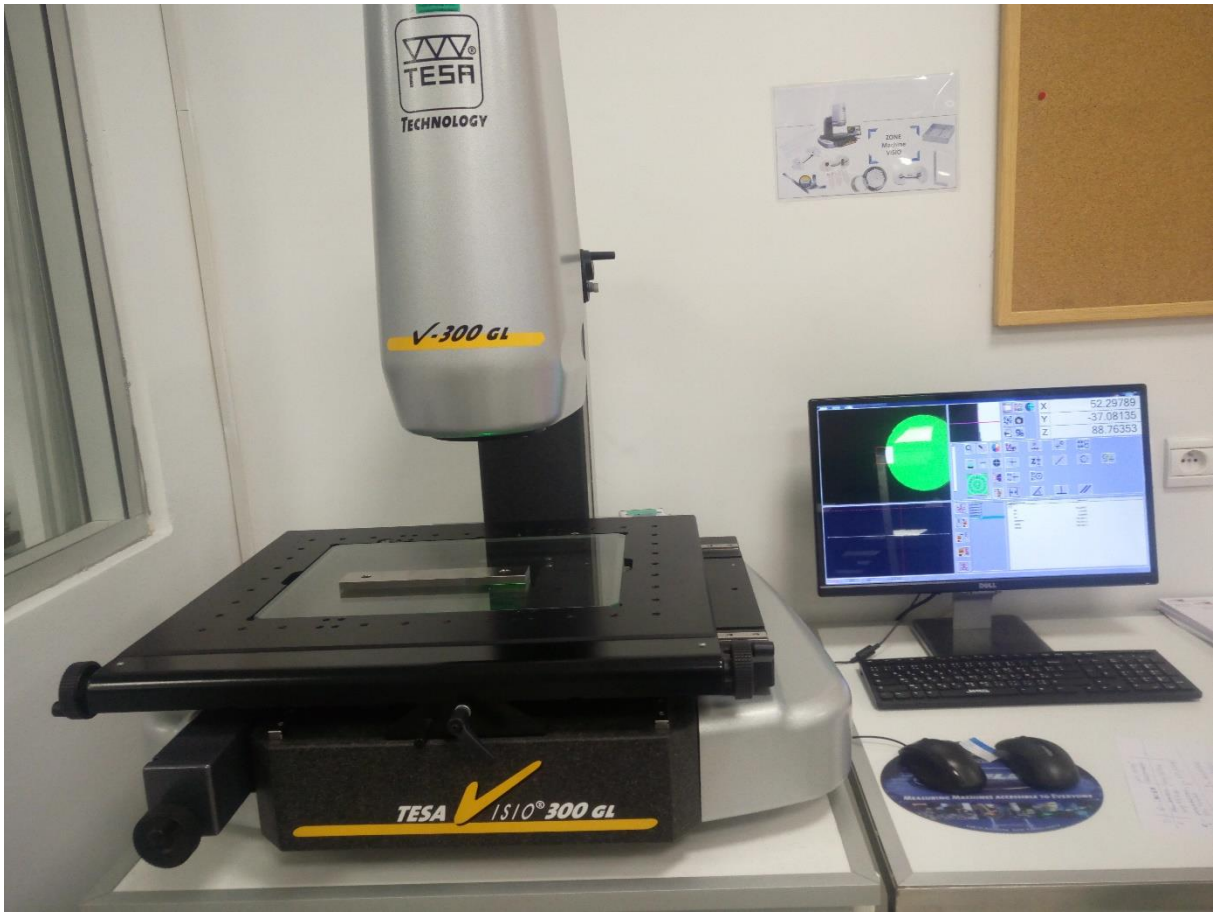


Figure 32 : Mesure sur la machine optique du laboratoire AirMetrologie

Nous avons procédé par la suite au calcul de l'entraxe par la division de la somme D_1+D_2 sur 2. Cet entraxe a pour valeur : **D_1D_2=150.569mm.**

2.2.2.2. Calcul de l'incertitude associée de la valeur mesurée du laboratoire AirMetrologie

Pour calculer l'incertitude finale d'étalonnage, on fait la somme quadratique des incertitudes définies ci- dessus :

$$U_e = 2 * \sqrt{U_c^2 + U_{répétabilité}^2 + U_{Température}^2} \quad \text{(Eq 42)}$$

- $U_{température} = \frac{\Delta T}{\sqrt{3}}$ (ΔT=3°C)

  $U_{température} = 1.73 \mu m$

- $U_{répétabilité} = 0.52 \mu m$ (Valeur donnée par le laboratoire Air Métrologie)

- $U_c = \sqrt{U_A^2 + U_{B1}^2 + U_{B21}^2 + U_{B31}^2 + U_{B4}^2 + U_{B5}^2 + U_{B6}^2 + U_{B7}^2 + U_{B8}^2}$

  Avec :

  - L'incertitude de type A est l'erreur estimée à partir des mesures réalisées sur des instruments d'étendues de mesure et de résolutions différentes représentant au mieux le domaine d'étalonnage, soit alors $\mathbf{U_A}$=0.52µm pour q=1 µm.
  - $\mathbf{U_{B1}}$ est l'incertitude due à la quantification de la machine (loi triangulaire) et est égale à (q/√(6))= 0.41 µm pour une résolution q=1 µm,
  - $\mathbf{U_{B21}}$ est l'Incertitude d'étalonnage de l'étalon à trait et est égale à 0.5 µm
  - $\mathbf{U_{B31}}$ est l'incertitude sur la dérive de l'étalon et est égale à 0.5 µm
  - $\mathbf{U_{B4}}$ est l'incertitude liée aux effets de la température et est égale à $3.83*10^{-7}*L$
  - $\mathbf{U_{B5}}$ est l'incertitude liée à la méconnaissance des coefficients de dilatation, et est égale à $1.41*10^{-5}*L$
  - $\mathbf{U_{B6}}$ est l'incertitude due à la différence des coefficients de dilatation entre les éléments, et est égale à $1.13*10^{-5}*L$
  - $\mathbf{U_{B7}}$ est l'incertitude due au positionnement sur la graduation de l'étalon, et égale à 1 µm
  - $\mathbf{U_{B8}}$ est l'incertitude due à l'erreur sur le défaut d'alignement, pour 50mm<L<200mm, nous avons $UB8=1.04*10^{-6}*L$
  - Au total, nous avons :

$$U_c = \sqrt{\begin{matrix} 0.52^2 + 0,41^2 + 0,5^2 + 0,5^2 + \left(3,83\times10^{-7}\times150,569\right)^2 + \left(1,41\times10^{-6}\times150,569\right)^2 \\ + \left(1,13\times10^{-5}\times150,569\right)^2 + 1^2 + \left(1,04\times10^{-6}\times150,569\right)^2 \end{matrix}}$$

Et par la suite, $\mathbf{U_{e/AirMetrologie}}$**=4.44 µm**

Le tableau ci-dessous résume les résultats de la comparaison interlaboratoires effectué entre ENSET-RABAT et AirMetrologie :

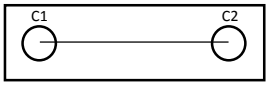
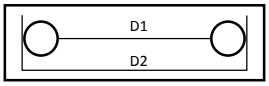
MMT ENSET		Air Métrologie
		
C_1	X = -25.017 mm	D_1 = 140.599 mm
	Y = -17.473 mm	
	Z = 0 mm	
C_2	X = -175.588 mm	D_2 = 160.539 mm
	Y = -17.368 mm	
	Z = 0 mm	
C_1C_2 = 150.571 mm		D_1D_2 = 150.569 mm
$C_1C_{2corrigée}$ = 150.572 mm		D_1D_2 = 150.569 mm
U_e = 2.46 µm		U_e = 4.44 µm

Tableau 23 : Les résultats de comparaison inter-laboratoires entre MMT-ENSET RABAT et AirMetrologie

2.2.3. Comparaison des résultats entre MMT ENSET et AirMetrologie

Pour comparer nos résultats, nous proposons d'utiliser la méthode de l'écart normalisé E_n définit dans la norme ISO 17043 [92]. Cette méthode est très utilisée dans l'analyse de comparaison inter-laboratoires. Elle permet de statuer sur la valeur mesurée pour voir si elle est significativement différente de la valeur de référence en tenant compte des incertitudes associées à chaque résultat. Il faut donc être très précis dans son calcul qui dépend des valeurs des participants (MMT-ENSET RABAT et Air Métrologie).

Cet écart est donné par :

$$E_n = \frac{|C1C2 - D1D2|}{\sqrt{U^2_{e(MMT)} + U^2_{e(Airmetro)}}} \quad \text{(Eq 43)}$$

Cette méthode considère que si E_n<1, le modèle est validé.

A partir des résultats trouvés, L'écart normalisé relatif à notre comparaison entre Notre laboratoire de l'ENSET et celui d'AIR METROLOGIE est égale à :

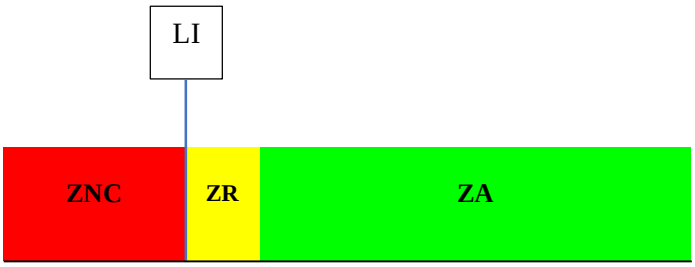
$$E_n = \frac{|150.572 - 150.569|}{\sqrt{0.0024^2 + 0.0044^2}}$$

Cet écart est égal à **En=0.59<1**, et donc on peut juger que compte tenu des incertitudes, la méthode proposée est validée et l'aptitude est satisfaisante et par la suite notre modèle estime correctement les erreurs et il peut être utilisé pour la correction des MMT cartésiennes.

3. Déclaration de conformité avec risque

L'évaluation de la conformité a pour objectif principal de déterminer si les exigences spécifiées relatives à un produit ou un à un système sont respectées ou non. Souvent, un test de conformité suit trois étapes distinctes : Mesure des attributs d'intérêt, comparaison des mesures et détermination des mesures à prendre en suivant la norme de certification ISO / CEI 17025 [83]des laboratoires d'étalonnage et d'essais. Lorsqu'une déclaration de conformité aux spécifications ou aux normes est requise, le fournisseur doit convenir avec le demandeur des règles de décision à utiliser, et en même temps considérer le niveau de risque associé aux règles (comme les fausses acceptations, les fausses rejets et hypothèses statistiques) utilisées. Il existe trois types de spécifications (tolérance) : les figures (a), (b) et (c)

a) Unilatérale inférieure

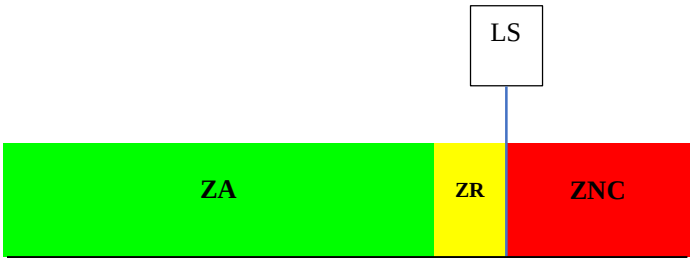


Règle de décision

a) Vm-U ≥ LI

Vm : Valeur mesurée
U : Incertitude élargie
LI : Limite inférieure
Vm dans la zone ZA : conforme sans risque
Vm dans la zone ZR : conforme avec risque
Vm dans la zone ZNC : Non conforme

b) Unilatérale Supérieure

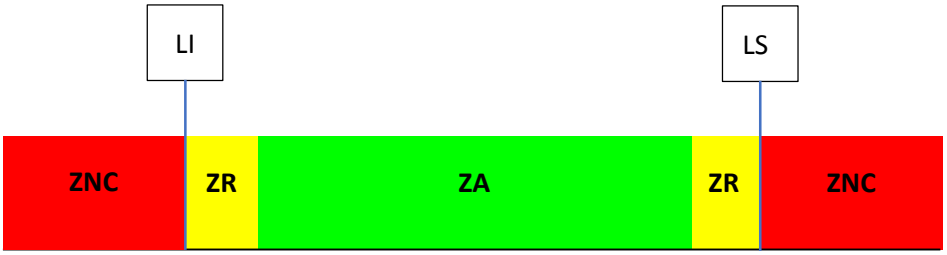


Règle de décision

b) Vm+U ≤ LS

Vm : Valeur mesurée
U : Incertitude élargie
LS : Limite supérieure
Vm dans la zone ZA : conforme sans risque
Vm dans la zone ZR : conforme avec risque

c) Bilatérale



Règle de décision

c) LI ≤ Vm±U ≤ LS

Vm : Valeur mesurée
U : Incertitude élargie
LI : Limite inférieure
Vm dans la zone ZA : conforme sans risque
Vm dans la zone ZR : conforme avec risque
Vm dans la zone ZNC : Non conforme

Figure 33: Les types de spécifications a), b) et c)

Toute vérification a pour finalité de donner une information avec un niveau de fiabilité suffisant pour être exploitée avec un risque faible et acceptable. Ceci pose donc naturellement la question des risques client et fournisseur, lorsque le résultat de mesure, entaché de son incertitude

de mesure conduit à un doute potentiel ; Autrement dit, la valeur mesurée se trouve dans la zone d'incertitude (zone de risque): lorsque le résultat se situe dans l'intervalle défini par la spécification mais en raison de l'incertitude de mesure, il y a une déclaration de mauvaise intégration, nous supportons le risque du client. De même, un résultat situé en dehors des limites de spécifications peut conduire à déclarer une non-conformité par erreur, on sera dans le risque fournisseur.

Pour une maîtrise optimale du risque, il est donc indispensable de connaître la dispersion du processus de mesure. En fait, compte tenu des résultats de mesure et des incertitudes associées, le concept de « risque » se limite à déterminer la possibilité que la valeur réelle dépasse la plage spécifiée.

Dans notre cas de figure, nous devons déclarer la conformité en prenant comme valeur la valeur corrigée en utilisant la matrice de correction ajoutée de l'incertitude élargie. Alors que dans la réalité, il faudrait prendre la valeur conventionnelle ajoutée de de l'incertitude élargie.

Avec cet écart, qui représente le résidu entre le réel et le modèle, nous allons calculer un risque de déclarer à tort la conformité de la machine par rapport aux spécifications.

Pour ce faire, on cherche les différences entre chaque valeur conventionnelle et sa valeur limite correspondante rapportée sur l'écart type du modèle proposé, puis on déduit le pourcentage de la perte de précision de la méthode. Ce pourcentage ne doit pas dépasser 5% du risque maximal toléré pour conclure sur la conformité.

Déclaration de conformité de la méthode					
Incertitude élargie de la matrice (mm)	0,00233	0,00246	0,00261	0,00277	0,00312
V conventionnelle (mm)	125,00004	150,0004	175,00006	200,0006	250,0006
$V_{corrigée}$ par la matrice (mm)	124,9998	150,0019	175,0013	200,0018	250,0015
Vmax =$V_{corrigée}$+U	125,00213	150,00436	175,00391	200,00457	250,00462
Valeur conventionnelle (Vconv+U)	125,002372	150,002863	175,00267	200,00337	250,003721
Zgauss Vmax **2*(V_{max}-V_{conv}) /U**	1,79414	3,21793	2,95029	2,86635	2,57680
Zguass (Vconv+U)	2	2	2	2	2
Probabilité **Zgauss Vmax**	0,963605	0,999354	0,998413	0,997924	0,995014
Probabilité **Zgauss (Vconv+U)**	0,977250	0,977250	0,977250	0,977250	0,977250
Risque perdu	0,013645	0,022105	0,021163	0,020674	0,017764
Perte de la précision de machine en %	1,36%	2,21%	2,12%	2,07%	1,78%

Tableau 24 : Les résultats de déclaration de conformité avec risque de la méthode

Les résultats montrent que le risque **R est inférieur à 5%** pour les 5 cales, le modèle est déclaré conforme. La valeur maximale de la perte de précision de la méthode est donnée pour la cale dont la valeur conventionnelle est de 150mm et elle est de 2.21% qui est très faible par rapport au risque acceptable de 5%. Par conséquent, la méthode proposée est au plus précise à 2.21

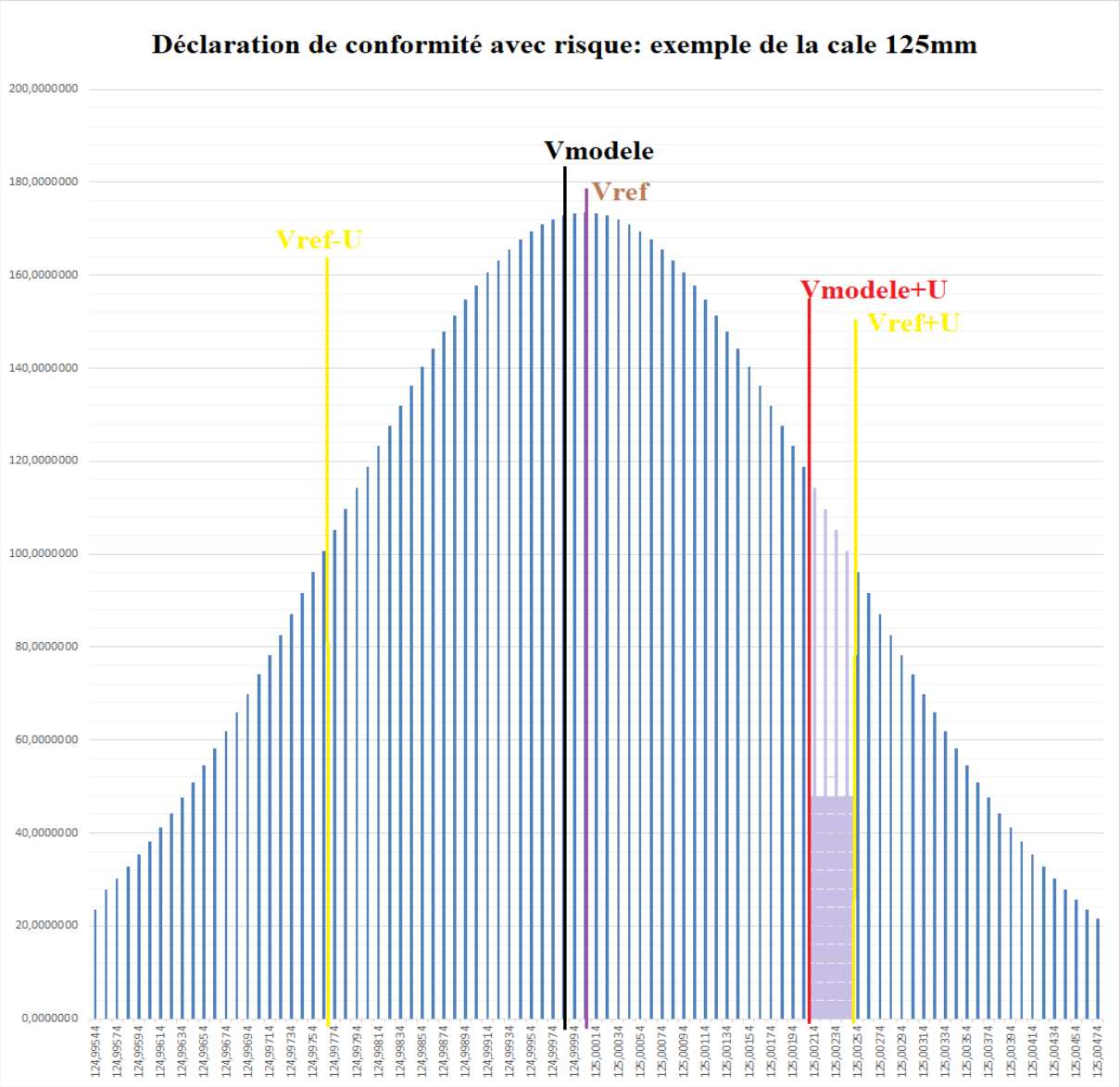


Figure 34 : Loi normale de la valeur de référence 125mm

Dans cette partie, nous avons montré que ce soit pour le contrôle final effectué par le fournisseur ou le contrôle de réception effectué par le client, il est impératif de vérifier les conditions d'étalonnage.

Conclusion

En faisant la mesure, Nous avons fait plusieurs essais ainsi qu'un calcul tout en garantissant le fait que la manière dont nous allons faire le compte rendu ne donnerait pas un résultat erroné de la valeur conventionnelle. Grace à la matrice de correction obtenue précédemment, nous aurons la possibilité de retrouver les valeurs initiales des étalons tout en empruntant le chemin inverse avec

un écart ne dépassant pas l'incertitude maximale de la matrice de correction. Ainsi tout calcul de la valeur mesurée sur la machine serait rectifié en rajoutant la matrice de correction obtenue par :

$$V_{c/i} = (J^t \times n_i)^t \times V_{lue/i}$$

Par conséquence, à la lumière de ce que nous avons démontré, nous pouvons dire le suivant :

Tant que la précision des instruments de mesure (en particulier les machines à mesurer tridimensionnelles) est à la base de l'industrie, le modèle que nous avons développé peut-être vérifier et la MMT peut être utilisée de manière fiable pour obtenir des résultats précis, que ce soit pour l'inspection finale du fournisseur ou par client. Par conséquent, étant donné que la précision de la matrice d'étalonnage est inférieure à 2%, le risque de déclarer incorrectement de bonnes pièces en cas de produits défectueux est trop faible, et la matrice est au précise à 2%.

Conclusion générale

Ce travail traite principalement de « l'étalonnage de la machine de mesure tridimensionnelles : matrice de correction et 'incertitudes ». La première étape de cette recherche est de vérifier les performances de la machine de mesure 3D utilisée pour la mesure de dimension linéaire en calculant l'erreur de longueur sur la base des 7 positions recommandées par la norme ISO 10360-2 [59]. Ces résultats nous ont menées vers une matrice de correction dont l'objectif est de déterminer les valeurs corrigées avec une haute précision sans l'obligation de séparer les erreurs de la machine et les erreurs du palpeur. Deuxièmement, nous avons calculé l'incertitude de mesure associée à l'aide de deux méthodes, GUM et MCM, pour vérifier le modèle proposé. Nous complétons les résultats expérimentaux en corrigeant les valeurs mesurées des pièces étalons et en comparant ces valeurs avec des valeurs de référence. Nous avons validé par la suite notre modèle par une comparaison inter-laboratoires en utilisant le critère d'aptitude préconisé dans la norme **ISO 17043** [92]**.**

Notre première contribution consiste à vérifier les performances de la machine de mesure tridimensionnelle selon la norme ISO 10360-2 [59]. Les essais de réception et de vérification périodique décrits dans cette norme ne s'appliquent que pour les MMT cartésiennes utilisant tout type de système de palpage à contact fonctionnant en mode de palpage discret. La présente norme permet d'obtenir les erreurs de palpage, de taille (justesse) et de répétabilité. Cependant, le résultat d'un mesurage n'est jamais précis et il est toujours soumis à des incertitudes. Un examen bien approfondi de la grandeur mesurée et du mode opératoire est nécessaire pour toute évaluation des incertitudes. La norme exige, pour juger la conformité d'un instrument de mesure, que la somme de la valeur absolue de l'erreur concernée et l'incertitude associée soit inférieure à L'erreur maximale tolérée par le fabricant ou le constructeur. Les essais d'acceptation et de vérification périodiques décrits dans la présente norme ne s'appliquent qu'aux machines à mesurer tridimensionnelles cartésiennes utilisant tout type de système de palpage de contact fonctionnant en mode discret. Nos essais de test expérimentaux nous permettent de vérifier les performances de la machine de mesure 3D puis de modéliser la matrice de correction pour étalonner la machine de mesure tridimensionnelle.

Dans la deuxième partie, nous avons introduit le sujet de l'incertitude de mesure sur le modèle d'étalonnage proposé. Nous avons d'abord évalué ces incertitudes par la méthode d'analyse GUM, qui est basée sur la méthode de dérivation du modèle de processus de mesure pour chacune

de ces variables. Ensuite, une comparaison possible entre les deux méthodes est faite en appliquant la simulation de Monte Carlo. La comparaison des deux méthodes nous a permis de vérifier le contenu décrit dans le supplément GUM 1 avec un intervalle de confiance à 95% et de conclure que le modèle développé pour la propagation de l'incertitude est valide.

Pour faciliter l'implémentation de ce modèle de correction, nous avons généralisé ce modèle sous forme matricielle composée de trois vecteurs directeurs du repère au lieu des 7 positions, dont l'objectif est d'appliquer la correction sur n'importe quelle mesure linéaire et dans n'importe quelle direction. Afin de confirmer les performances de la méthode proposée, nous comparons ensuite la valeur corrigée de notre modèle avec la valeur d'un laboratoire accrédité COFRAC, et la comparons à l'écart normalisé établie dans la norme d'application 17043 [92].

Afin de compléter le diagnostic du MMT dans son environnement de travail et d'assurer le fonctionnement normal de la machine, une étude sur l'impact de l'échantillonnage sur la déclaration de conformité a été proposée. Elle permet de déterminer si les exigences spécifiées relatives à un produit ou à un système sont respectées ou non. Les résultats ont prouvé que le modèle est déclaré conforme puisque la valeur maximale de la perte de précision est très faible par rapport au risque acceptable de 5%.

Perspectives :

Au terme de la recherche proposée dans ce projet de thèse, différents points de vue semblaient pertinents et méritent l'attention :

- Introduire l'incertitude de la gamme de mesure dans les composantes d'incertitudes du modèle. Cela implique l'introduction d'incertitudes liées à la gamme de mesure générée par le métrologue lors de la vérification des dimensions ou des spécifications géométriques, en passant par les étapes de base de la mesure, y compris l'étalonnage du palpeur, la saisie des points et la corrélation des éléments géométriques associés, y compris le palpage des nuages et l'élément saisi, et la vérification des spécifications, qui comprend l'incertitude cumulative de type A ou de type B. L'évaluation de la conformité comprend la vérification de la présence ou non de l'élément "tolérancé" dans la zone de conformité, en tenant compte des incertitudes.
- Intégrer la matrice de correction dans le logiciel de la MMT en développant un programme d'application et en l'associant à la table des points de mesure donnée par le logiciel de la

machine, afin de nous fournir automatiquement la valeur de correction du point de détection.

- Généralisation du modèle proposé au cas des bras robots. Si le bras de mesure ne fournit pas la valeur attendue, nous pouvons rectifier l'instrument de mesure selon la norme 10360-12. La présente partie de la norme 10360 détaille les essais de réception visant à évaluer la fiabilité d'une MMT à bras articulés en mesurant des longueurs d'essai étalonnées soient conformes aux spécifications du fabricant. Il définit également des tests de vérification périodiques afin que les métrologues puissent vérifier périodiquement les performances de la MMT à bras articulé. Elle est conçue pour les MMTs à bras articulés qui utilisent généralement des palpeurs tactiles et optionnellement des détecteurs optiques sans contact.

[1] P. Bourdet, «Logiciels des machines à mesurer tridimensionnelles: Mesures et controles R1316,» 1999.

[2] A.H et Slocum, «Precision MAchine Design,» Prentice Hall, 1992.

[3] S. Talabaew, «Modeling and predicting the performance of Co-ordinate Measuring Machine,» B.S.king Mongkut‘s institute of technology thomburi, Thailand, 1993.

[4] C.Wick et R. Veilleux, «Tool and Manufacturing Engineers Handbook,,» Quality Control and Assembly: Society of Manufacturing Engineers, Dearborn,, vol. 5, pp. 3-48,3-54, 1987.

[5] J. Hocken et H. Pereira, «Coordinate Measuring Machines and Systems,» M.Dekker, 1995.

[6] D. R, «Test von Software tar Koordnatenme Bgeräte mit Hilfe Von simulierter Daten,» 1989.

[7] «International Vocabulary of Metrology—Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM),» 200:2012, JCGM, 2012.

[8] A. Balsamo, M. Franke, E. Trapet, F. Waeldele, L. D. Jonge et and P. Vanherck, «‘Results of the CIRP-Euromet intercomparison of ball plate-based techniques for determining CMM parametric errors,» CIRP Annals—Manufacturing Technology, vol. 46, pp. 463-466, 1997.

[9] N. A. Barakat, M. A. Elbestawi et A. D. Spence, «Kinematic and geometric error compensation of a co-ordinate measuring machine,» International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 40, pp. 833-850, 2000.

[10] R. Hocken, J. A. Simpson, B. Borchardt, J. Lazar, C. Reeve et P. Stein, «Three-dimensional metrology,» Annals of the CIRP,, vol. 26, pp. 403-408, 1977.

[11] S. Sartori and G. X. Zhang, «Geometric error measurement and compensation of machines,» CIRP Annals—Manufacturing Technology, vol. 44, pp. 599-609, 1995.

[12] G. X. Zhang et J. Y. Fu, «Method for optical CMM calibration using a grid plate,» CIRP Annals—Manufacturing Technology,, vol. 49, pp. 399-402, 2000.

[13] G. Zhang, R. Veale, T. Charlton, B. Borchardt et R. Hocken, «Error compensation of co-ordinate measuring machines,» Palermo, italy, pp. 445-448, 1985.

[14] P. Cauchick-Miguel, T. King et J. Davis, «CMM verification: a survey Measurement,» Journal of the International Measurement Confederation, vol. 17, pp. 1-16, 1996.

[15] Du et J. S. Agapiou, «Assuring the day-to-day accuracy of co-ordinate measuring machines: a comparison of tools and procedures,» Journal of Manufacturing Processes, vol. 9, pp. 109-120, 2007.

[16] Chen, J. Chen et Y. F., «Estimation of co-ordinate measuring machine error parameters,» New York, NY, USA, pp. 196-201, 1987.

[17] J. B. Silva De Aquino et M. Burdekin, «A modular space frame for assessing the performance of coordinate measuring machines (CMMs),» Precision Engineering, vol. 26, pp. 37-48, 2002.

[18] H. Schwenke, M. Franke, J. Hannaford et H. Kunzmann, «Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer,,» CIRP Annals—Manufacturing Technology, vol. 54, pp. 475-478, 2005.

[19] J. S. Chen, T. W. Kou et S. H. Chiou, «Geometric error calibration of multi-axis machines using an auto-alignment laser interferometer,» Precision Engineering, vol. 23, pp. 243-252, 1999.

[20] A. Harvie, «Coordinate measuring machine accuracy,» Quality today, pp. 26, 28, 30, 1986.

[21] P. Bourdet, «Contribution à la mesure tridimensionnelle : Modèle d'identification géométrique des surfaces, Métrologie fonctionnelle des pièces mécaniques, Correction géométrique des machines à mesurer tridimensionnelles,» Université de Nancy 1, France, , 1987.

[22] J. A. Bosch, «coordinate measuring machines and systems,» Marcel Dekker, ed, New York , 1995.

[23] King, P. A. C. Miguel et T. G., «Co-ordinate measuring machines. Concept, classification and comparison of performance tests,» International Journal of Quality and Reliability Management, vol. 12, pp. 48-63, 1994.

[24] S. Osawa, T. Takatsuji, H. Noguchi et T. Kurosawa, «Development of a ball step-gauge and an interferometric stepper used for ball-plate calibration,» Precision Engineering, vol. 26, pp. 214-221, 2002.

[25] J.-p. Mathien, «Contrôle des machines à mesurer,» Techniques de l'Ingénieur, traité mesures et contrôle, vol. R1318, 1995.

[26] Jawahir, J. F. Ouyang et S. I, «Ball array calibration on a co-ordinate measuring machine using a gage block,» Journal of the International Measurement Confederation, vol. 16, pp. 219-229, 1995.

[27] ". Zhang, R. Ouyang et and B. Lu, «A Displacement method for machine geometry calibration,» Annals of the CIRP, vol. 37, 1988.

[28] G. Chen, J. Yuan et J. Ni, «Displacement measurement approach for machine geometric error assessment,» International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 41, pp. 149-161, 2001.

[29] Burdekin, C. K. Lim et M., «Rapid volumetric calibration of co-ordinate measuring machines using a hole bar artefact,,» Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture, vol. 216, pp. 1083-1093, 2002.

[30] E. Curran and P. Phelan, «Quick check error verification of co-ordinate measuring machines,» Journal of Materials Processing Technology, Vols. 1 sur 2155-156, pp. 1207-1213, 2004.

[31] S. D. Phillips, D. Sawyer, B. Borchardt, D. Ward et D. E. Beutel, «Novel artefacts for testing large co-ordinate measuring machines,» Precision Engineering, vol. 25, pp. 29-34, 2001.

[32] J. P. Kruth, L. Zhou, C. V. Bergh et a. P. Vanherck, «A Method for Squareness Error Verification on a Co-ordinate Measuring Machine,» International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 21, pp. 874-878, 2003.

[33] H. Schwenke, M. Franke, J. Hannaford et H. Kunzmann, «Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer,» CIRP Annals.-Manufacturing Technology, vol. 54, pp. 475-478, 2005.

[34] W. Bosemann, M. Dauke et others, «Inspection of large CMMs by sequential multilateration using a single laser tracker,» vol. 44, 2003.

[35] A. Balsamo, P. Pedone, E. Ricci et M. Verdi, «Low-cost interferometric compensation of geometrical errors,» CIRP Annals: Manuf. Technology, vol. 58, pp. 459-462, 2009.

[36] P. Pedone, E. Audrito et A. Balsamo, «Compensation of CMM geometrical errors by the GEMIL technique: Experimental results,» CIRP Annals. —Manuf. Technol, vol. 63, n°1, pp. 489-492, 2014.

[37] Mayer, A. Nafi et J. R. R., «Identification of scale and squareness errors on a CMM using a step gauge measured based on the ASME 89.4. 10360.2-2008 standard,» Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME, vol. 38, pp. 325-332, 2010.

[38] Mayer, T. O. Ekinci et J. R. R., «Relationships between straightness and angular kinematic errors in machines,» Institute. J. Mach. Tools Manuf, vol. 47, n°12-13, pp. 1997-2004, 2007.

[39] VCMM, User Manual, PTB Braunschweig, 2002.

[40] H. Tikka, Calibrating a boring plate and checking a 3-Dimensional Measuring Machine by that One, 1982.

[41] W. Knapp, U. Tschudi et A. Bucher, «Comparison of different artefacts for interim coordinate-measuring machine checking: a report from the Swiss Standards Committee,» Precision Engineering., vol. 13, n°4, pp. 277-291, 1991.

[42] L. Nawara and J. S\ladek, «Influence of surface state on the measuring accuracy measuring machine,» in 7th International Conference on Production Engineering,, n°1 Tokyo Japan, pp. 696-671, 1984.

[43] H. H. Schussler, «Quadrangular test body for the acceptance and monitoring of coordinate measuring instruments,» vol. 93, p. 118, 1983.

[44] V. Zeleny, «Coordinate measuring machines calibration in the czech republic,» Proceedings of 6th ISMQC IMEKO Symposium., Wien, Austria, , pp. 8-10, 1998.

[45] V. Zeleny, «Calibration of coordinate measuring machines with respect to standards,» vol. 18, p. 32, 2002.

[46] Q. C. Dang, S. Yoo et S.-W. Kim, «Complete 3-D self-calibration of coordinate measuring machines,» CIRP Ann.-Manuf. Technol, vol. 55, n°1, pp. 527-530, 2006.

[47] Butler, C. Fang et D. L., «An innovative method for coordinate measuring machine one-dimensional self-calibration with simplified experimental process,» vol. 84, n°5, pp. 55-103, 2013.

[48] G. Schulz and J. Grzanna, «Absolute flatness testing by the rotation method with optimal measuring-error compensation,» vol. 31, n°19, pp. 3767-3780, 1992.

[49] J.-P. Kruth, P. Vanherck et L. De Jonge, «Self-calibration method and software error correction for three-dimensional coordinate measuring machines using artefact measurements,» Measurement, vol. 14, n°2, pp. 157-167, 1994.

[50] T. Coorevits, J. P. David et P. Bourdet, «Elimination of geometrical errors by permutations–application to a rotary table,» CIRP Ann.-Manuf. Technol., vol. 40, n°1, pp. 531-534, 1991.

[51] H. Kunzmann, E. Trapet et F. Wäldele, «A uniform concept for calibration, acceptance test, and periodic inspection of coordinate measuring machines using reference objects,» CIRP Ann.-Manuf. Technol., vol. 39, n°1, pp. 561-564, 1990.

[52] S. J. Lee et D. Chang, «1-D space ball array calibration methodology for coordinate measurement machine,» Journal of Physics: Conference Series,, vol. 13, p. 194, 2005.

[53] M. R. Raugh, «Absolute 2-D Sub-Micron Metrology For Electron Beam Lithography,» Integrated Circuit Metrology II, vol. 480, pp. 145-164, 1984.

[54] J. Ye, M. Takac, C. N. Berglund, G. Owen et a. R. F. Pease, «An exact algorithm for self-calibration of two-dimensional precision metrology stages,» precision engineering, vol. 20, n°1, pp. 16-32, 1997.

[55] L. Laouina, «Contribution à la vérification de la MMT, développement et mise en application de la méthode de séparation,» 2018.

[56] «ISO 10360».

[57] A.Jalid, «Contribution à l'évaluation des incertitudes liées aux résultats de mesure tridimensionnelle,» lille1, 2007.

[58] ISO 10360-2 2009 — Spécification géométrique des produits (GPS) -- Essais de réception et de vérification périodique des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) -- Partie 2 : MMT utilisées pour les mesures de dimensions linéaires..

[59] ISO 10360-3 : 2000 Spécifications géométriques des produits (GPS) - Essais réception et de vérification pour les machines de mesure tridimensionnelles (MMT) - Partie 3 : MMT avec l'axe d'un plateau tournant comme quatrième axe.

[60] ISO 10360-4 : 2000 Spécifications géométriques des produits (GPS) — Essais de réception et de vérification des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) — Partie 4 : MMT utilisées en mode de mesure par scanning.

[61] ISO/DIS 10360-5 - Spécification géométrique des produits (GPS) -- Essais de réception et de vérification périodique des systèmes à mesurer tridimensionnelles (SMT) -- Partie 5 : MMT utilisant des systèmes de palpage à stylet simple ou à stylets multiples.

[62] ISO 10360-6 : 2001 Spécifications géométriques des produits (GPS) - Essais de réception et de vérification des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) — Partie 6 : Estimation des erreurs dans le calcul des caractéristiques gaussiennes associées..

[63] ISO 10360-7 : 2011 — Spécification géométrique des produits (GPS) -- Essais de réception et de vérification périodique des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) -- Partie 7 : MMT équipées de systèmes de palpage imageurs.

[64] ISO 10360-8 : 2013 — Spécification géométrique des produits (GPS) -- Essais de réception et de vérification périodique des systèmes de mesure tridimensionnels (SMT) -- Partie 8 : MMT avec détecteurs optiques sans contact.

[65] ISO 10360-9 : 2013 — Spécification géométrique des produits (GPS) -- Essais de réception et de vérification périodique des systèmes de mesure tridimensionnels (SMT) -- Partie 9 : MMT avec systèmes de palpage multiples.

[66] ISO 10360-12 : 2016 — Spécification géométrique des produits (GPS) -- Essais de réception et de vérification périodique des systèmes de mesure tridimensionnels (SMT) -- Partie 12 : Machines à mesurer tridimensionnelles à bras articulés (MMT).

[67] ISO 10360-11 : Spécification géométrique des produits (GPS) -- Essais de réception et de vérification périodique des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) -- Partie 11 : en cours d'élaboration.

[68] «Evaluation of Measurements of a Single Measurand, Measurement Uncertainty. 1996.,» 1996.

[69] N. A. Barakat, M. A. Elbestawi et A. D. Spence, «Kinematic and geometric error compensation of a coordinate measuring machine,» Int. J. Mach. Tools Manuf, vol. 40, n°6, pp. 833-850, 2000.

[70] S. Sartori and G. X. Zhang, «Geometric error measurement and compensation of machines,» CIRP Ann.-Manuf. Technol, vol. 44, n°2, pp. 599-609, 1995.

[71] P. A. C. Miguel et T. G. King, «Co-ordinate measuring machines: concept, classification and comparison of performance tests,‖ Int. J. Qual. Reliab. Manag,» International Journal of Quality Reliability Management, vol. 12, n°8, pp. 48-63, 1995.

[72] P. Cauchick-Miguel, T. Kinga et J. Davis, «CMM verification,» Measurement, vol. 17, n°1, pp. 1-16, 1996.

[73] F. A. M. Ferreira, J. d. V. y. Oliva et A. M. S. Perez, «Evaluation of the Performance of Coordinate Measuring Machines in the Industry, Using Calibrated Artefacts,» Procedia Engineering, vol. 63, pp. 659-668, 2013.

[74] A. K. Elshennawy and I. Ham, «Performance improvement in coordinate measuring machines by error compensation,» Journal of manufacturing system, vol. 9, n°2, pp. 151-158, 1990.

[75] E. Savio and L. De Chiffre, «Performance verification of CMMs for free form measurements,» International conference: european society for precision engineering and nanotechnology., pp. 362-365, 2001.

[76] A. Gąska, M. Krawczyk, R. Kupiec, K. Ostrowska, P. Gąska et J. Sładek, «Modeling of the residual kinematic errors of coordinate measuring machines using LaserTracer system,» International Journal of Advanced Manufacturing ans Technology.,, vol. 73, n°1-4, pp. 497-507, 2014.

[77] R. Calvo, R. D'Amato, E. Gómez et R. Domingo, «Integration of Error Compensation of Coordinate Measuring Machines into Feature Measurement,» Part I—Model Development,‖ Sensors, vol. 16, n°110, 2016.

[78] G. H. J. Florussen, F. L. M. Delbressine, M. J. G. v. d. Molengraft et P. H. J. Schellekens, «Assessing geometrical errors of multi-axis machines by three-dimensional length measurements,» Measurement, vol. 30, n°4, pp. 241-255, 2001.

[79] J. B. de Aquino Silva and M. Burdekin, «A modular space frame for assessing the performance of co-ordinate measuring machines (CMMs),» Precision Engineering, vol. 26, n°11, pp. 37-48, 2002.

[80] «International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM).,» Joint Committee for Guides in Metrology, 200:2012, 2012.

[81] «Acceptance test and reverification test for CMMs – Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions,» 10360.2-2008, 2008.

[82] «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,» 15530-3, 2011.

[83] «Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais,» ISO 17025, 2017.

[84] GUM, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Geneva, Switzerland, , 1995.

[85] A.C. Baratto, «Measurand: a corner stone concept in metrology,» Metrologia 45, pp. 299-307, 2008.

[86] M. A. Herrador et A. Gonzalez, pp. 415-422, 2004.

[87] M. S.-B. Fernandez, J. A. Calderon et P. B. Diez, «Accreditation and Quality Assurance,» pp. 95-106, 2009.

[88] G. Wübbeler, M. Krystek et C.Elster, «Evaluation of measurement uncertainty and its numerical calculation by a Monte Carlo method.,» Measurement Science and Technology, pp. 1-4, 2008.

[89] «Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the « Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement » - Propagation of distributions using a Monte Carlo method,» BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP et OIML..

[90] James E. GENTLE, «Random Number Generation and Monte Carlo methods,» Springer, Statistics and Computing, second Edition., 2003.

[91] H. SCHWENKE, B. L. SIEBERT, F. WÄLDELE et H. KUNZMANN, «Assessment of Uncertainties in Dimensional Metrology by Monte Carlo Simulation: Proposal of a Modular and Visual Software,» Annals of the CIRP, vol. 49, n°1, 2000.

[92] «Évaluation de la conformité — Exigences générales concernant les essais d'aptitude,» ISO 17043, 2010.

[93] «Incertitude de mesure — Partie 4: Rôle de l'incertitude de mesure dans l'évaluation de la conformité,» ISO 98-4, 2012.

[94] «Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison,» ISO 15328, 2015.

[95] «Geometrical Product Specifications (GPS)—Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM)—Part 2: CMMs used for measuring size,» Geneva, Switzerland.

[96] K. Bahassou, A. Salih, A. Jalid et M. Oubrek, «MODELING OF THE CORRECTION MATRIX FOR THE CALIBRATION OF MEASURING MACHINES,» International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET), vol. 8, n°10, p. pp. 862–870, October 2017.

[97] K. Bahassou, A. Salih, M. Oubrek et A. Jalid, «MEASUREMENT UNCERTAINTY ON THE,» International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET), vol. 10, n°2, pp. pp. 669-676,, April 2019.