



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAÏD – TLEMCCEN
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire

En vue de l'obtention du Diplôme de Magister
en Technologie Mécanique Avancée

Option

Fabrication et Productique

Présenté par :

Mr MANGOUCI Ahmed

Thème

**Exploration des moyens d'association de surfaces
aux points palpés
sur machine à mesurer tridimensionnelle**

Soutenu le

Devant le jury :

Président	BOURDIM Abdelghaffour	Maître de conférence	UABB Tlemcen
Rapporteur	CHEIKH Abdelmadjid	Maître de conférence	UABB Tlemcen
Rapporteur	GHERNAOUT Amine	Chargé de cours	UABB Tlemcen
Examineur	HAMOU Saïd	Maître de conférence	UABB Tlemcen
Examineur	BENAMAR Ali	Maître de conférence	ENSET Oran

Année universitaire 2004 - 2005

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Introduction..... 1

CHAPITRE I

Spécifications Géométriques des Produits (GPS)

1.1. Introduction	3
1.2. Concepts du tolérancement macro-géométrique	4
1.2.1 Géométrie nominale.....	4
1.2.1.1. <i>Classes d'invariance</i>	5
1.2.1.2. <i>Eléments simples</i>	7
1.2.1.3. <i>Formes des éléments nominaux</i>	7
1.2.1.4. <i>Situation relative ou positionnement des éléments nominaux</i>	8
1.2.2. Géométrie réelle.....	10
1.2.3. Géométrie avec défauts.....	11
1.2.3.1. <i>Analyse des normes</i>	11
1.2.3.2. <i>Expression de la limitation des écarts par les normes de spécification ISO</i>	12
1.2.4. Modélisation des formes géométriques d'une pièce (éléments tolérancés et de références).....	13
1.2.4.1. <i>Modélisation des éléments géométriques idéaux nominaux</i>	14
1.2.4.2. <i>Modélisation des éléments réels</i>	14
1.2.5. Les approches développées pour l'intégration CFAO.....	15
1.3. Conclusion	15

CHAPITRE 2

Machine à mesurer tridimensionnelle MMT

2.1. Introduction	17
2.2. Développement de la machine à mesure tridimensionnelle	18
2.2.1. Historique.....	18
2.2.2. Principe.....	18

2.2.3. Les différentes morphologies de MMTs.....	19
2.2.3.1. <i>Machine de type portique</i>	19
2.2.3.2. <i>Machine de type trusquin</i>	19
2.2.3.3. <i>Machine type col de cygne</i>	19
2.2.3.4. <i>Machine de type pont mobile</i>	19
2.2.3.5. <i>Machine de type cylindro-polaire</i>	19
2.2.4. Composition de la machine à mesurer tridimensionnelle type col de cygne.....	20
2.2.4.1. <i>D'un marbre en granit</i>	20
2.2.4.2. <i>De trois glissières x, y, z</i>	20
2.2.4.3. <i>Logiciel de traitement</i>	20
2.2.4.4. <i>Capteur</i>	21
2.2.4.5. <i>Système de pré-traitement</i>	21
2.2.4.6. <i>Opérateur</i>	21
2.3. Etat de l'art en métrologie tridimensionnelle	21
2.4. Capteurs à déclenchement	22
2.4.1. Introduction.....	22
2.4.2. Caractéristiques métrologiques du capteur.....	23
2.4.3. Système de palpage dynamique.....	23
2.4.4. Principe de fonctionnement.....	23
2.4.5. Présentation des capteurs.....	24
2.4.6. Accessoires.....	25
2.4.6.1. <i>Les stylets</i>	25
2.4.6.2. <i>Sélection des stylets</i>	25
2.5. La MMT et son environnement	26
2.6. Convivialité	27
2.7. Critères d'association de surfaces aux points palpés	28
2.7.1. Introduction.....	28
2.7.2. Point de vue de la métrologie tridimensionnelle.....	28
2.7.3. Calcul des points mesurés.....	30
2.7.4. Expression des écarts entre le réel et le modèle géométrique nominal	30
2.7.5. Eléments géométriques associés aux éléments palpé.....	31
2.7.5.1. <i>Outils d'association d'éléments géométriques à un nuage de points</i>	31
2.7.5.2. <i>Principaux critères d'association de surfaces</i>	32

2.8. Exploration des moyens d'association d'une surface géométrique idéale	
à un nuage de points	34
2.8.1. Première étape.....	35
2.8.2. Deuxième étape.....	35
2.8.3. Troisième étape.....	36
2.8.4. Quatrième étape.....	37
2.8.5. Cinquième étape.....	37
2.9. Principe du contrôle virtuel	37
2.10. Conclusion	38

CHAPITRE 3

Applications du contrôle des spécifications géométriques de forme

3.1. Problématique	39
3.2. Application du contrôle de la rectitude	39
3.2.1. Contrôle sur marbre à l'aide du comparateur de la première pièce "semelle".....	39
3.2.1.1. <i>Calcul des défauts de forme nominaux</i>	42
3.2.1.2. <i>Constatation</i>	42
3.2.1.3. <i>Calcul des moyennes arithmétiques des écarts de mesure</i>	42
3.2.2. Contrôle de la rectitude par machine à mesurer tridimensionnelle de la semelle.....	43
3.2.2.1. <i>Illustration graphique des points palpés et l'étendue du défaut de rectitude</i>	44
3.2.2.2. <i>Constatation</i>	44
3.2.3. Contrôle sur marbre à l'aide du comparateur de la seconde pièce "glissière".....	44
3.2.3.1. <i>Calcul des défauts de forme nominaux</i>	45
3.2.3.2. <i>Constatation</i>	46
3.2.3.3. <i>Calcul des moyennes arithmétiques des écarts de mesure</i>	46
3.2.4. Contrôle de la rectitude par machine à mesurer tridimensionnelle de la glissière.....	46
3.2.4.1. <i>Illustration graphique des points et défaut de rectitude de la 1^{ère} mesure</i>	47
3.2.4.2. <i>Constatation</i>	48
3.3. Application du contrôle de la planéité	48
3.3.1. Contrôle sur du marbre à l'aide du comparateur de la pièce "palier".....	48
3.3.1.1. <i>Calcul des défauts de forme nominaux</i>	52
3.3.1.2. <i>Constatation</i>	52

3.3.1.3. <i>Calcul des moyennes arithmétiques des écarts de mesure</i>	52
3.3.2. Contrôle de la planéité par machine à mesurer tridimensionnelle.....	53
3.3.2.1. <i>Calcul des étendues des défauts de forme nominaux</i>	55
3.3.2.2. <i>Défauts de planéité</i>	56
3.3.2.3. <i>Constatation</i>	57
3.4. Application du contrôle de la circularité	58
3.4.1 Contrôle sur marbre à l'aide du comparateur de la pièce "roulement".....	58
3.4.1.1. <i>Calcul des défauts de forme de la circularité</i>	59
3.4.1.2. <i>Constatation</i>	59
3.4.1.3. <i>Calcul des moyennes arithmétiques des écarts de mesure de la circularité</i> ..	60
3.4.2. Contrôle de la circularité par machine à mesurer tridimensionnelle.....	60
3.4.2.1. <i>Défauts de circularité du roulement</i>	61
3.4.2.2. <i>Constatation</i>	61
3.5. Tableau récapitulatif des résultats	62
3.6. Conclusion	62

CHAPITRE 4

Modèle mathématique du critère d'association de surfaces

4.1. Introduction	64
4.2. Rectitude	64
4.2.1. Régression en Y par rapport à X.....	64
4.2.2. Régression en X par rapport à Y.....	65
4.2.3. La structure du programme de calcul des paramètres.....	65
4.3. Planéité	69
4.3.1. La structure du programme de calcul des paramètres.....	71
4.4. Circularité	74
4.4.1. La structure du programme de calcul des paramètres.....	76
4.5. Conclusion	78

CHAPITRE 5

Conception du programme informatique CAO

5.1. Introduction	79
5.2. Démarche métrologique du contrôle	79

5.3. Organigramme général	81
5.4. Conception du programme CAO pour vérification des spécifications	82
5.4.1. Fonctionnalités des différents boutons.....	82
5.4.1.1. <i>Rectitude</i>	82
5.4.1.2. <i>Planéité</i>	82
5.4.1.3. <i>Circularité</i>	82
5.4.1.4. <i>Aide</i>	82
5.4.1.5. <i>Quitter</i>	83
5.4.2. Interface du programme.....	83
5.5. Exemples de vérification de la rectitude par le programme informatique	84
5.5.1. Vérification de la rectitude de la pièce « semelle ».....	84
5.5.1.1. <i>Interprétation du graphe</i>	86
5.5.1.2. <i>Comparaison des résultats et validation</i>	86
5.5.1.3. <i>La rectitude de la pièce "semelle" est acceptée (si $IT_f > 0.0625$)</i>	87
5.5.2. Vérification de la rectitude de la pièce « glissière ».....	87
5.5.2.1. <i>Interprétation du graphe</i>	88
5.5.2.2. <i>Comparaison des résultats et validation</i>	89
5.5.2.3. Pièce rejetée avec $IT = 0.0108$ mm.....	89
5.6. Exemple de vérification de la planéité par le programme informatique	90
5.6.1. Vérification de la planéité de la pièce « palier moteur ».....	90
5.6.1.1. <i>Interprétation du graphe</i>	91
5.6.1.2. <i>Comparaison des résultats et validation</i>	91
5.6.1.3. <i>Pièce acceptée avec $IT = 0.0122$ mm</i>	92
5.6.1.4. <i>Pièce rejetée avec $IT = 0.0087$ mm</i>	92
5.7. Exemple de vérification de la circularité par le programme informatique	93
5.7.1. Vérification de la circularité de la pièce « roulement ».....	93
5.7.1.1. <i>Interprétation du graphe</i>	94
5.7.1.2. <i>Comparaison des résultats et validation</i>	94
5.7.1.3. <i>Pièce rejetée avec $IT = 0.007$ mm</i>	94
5.8. Conclusion	95
Conclusion générale et perspective.....	96
Références bibliographiques.....	97
Normes.....	99

Annexe A : Tolérances de forme.....	100
Annexe B : Tolérances d'orientation et de position.....	101
Annexe B (suite) : Tolérances de position.....	102
Annexe C : Tolérances de battement	103
Annexe D : Vérifications géométriques.....	104
Annexe D (suite) : Vérifications géométriques.....	105
Annexe E : Rapport de contrôle de la semelle.....	106
Annexe F : Rapport de contrôle de la glissière.....	107
Annexe G : Rapport de contrôle du roulement.....	108

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قال الله تعالى :

يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا

الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ وَاللَّهُ بِمَا تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ.

(سورة المجادلة، الآية 11)

Remerciements

Je voudrais exprimer mes remerciements les plus sincères et ma reconnaissance à mon directeur de projet monsieur CHEIKH Abdelmadjid maître de conférence au département de génie mécanique (faculté des sciences de l'ingénieur -Université Aboubakr BELKAID Tlemcen) pour son accueil chaleureux, sa disponibilité, son soutien et ses précieux conseils tout au long de ce travail de ma formation en post-graduation. De même, mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon professeur monsieur GHARNAOUT Amine pour ses conseils ciblés et sa disponibilité.

Je suis reconnaissant à messieurs BOURDIM Abdelghaffour maître de conférence (UABB-Tlemcen), HAMOU Saïd maître de conférence (UABB-Tlemcen), BENAMAR Ali maître de conférence (ENSET-Oran), pour l'intérêt qu'ils témoignent à mes travaux et pour avoir accepté d'examiner le contenu scientifique de ce mémoire.

Mes sincères remerciements à monsieur KAROUI Arezki pour l'aide technique lors du contrôle des pièces utilisées dans ce travail et de m'avoir accueilli dans son laboratoire de métrologie à l'ENSET d'Oran.

Mes vifs remerciements vont aussi à mes professeurs de post-graduation pour leurs entières disponibilités de l'année théorique 2002-2003.

Je remercie également monsieur le chef des travaux DOUZI Khatir de son soutien de mon travail expérimental effectué au sein du Technicum Besseghier Lakhdar Tlemcen.

Je remercie également monsieur KHERBOUCHE Oussama de son aide durant mon travail de l'élaboration du programme informatique.

Mes sincères remerciements à mon collègue de magister monsieur KARA Ali Djamel et tous les autres de la promotion 2005 de leurs gentillesse et leurs esprits de travail en équipe.

Enfin mes remerciements à tout le personnel administratif de la faculté des Sciences de l'Ingénieur de l'Université de Tlemcen Chétouane.

MANGOUCI Ahmed

Dédicaces

A mes parents pour leur soutien moral,
A ma femme pour son aide et sa patience durant toute la durée de ma formation,
A mes enfants, Ilyes de ses efforts fournis, Douâa de sa gentillesse, et aux petits
Louey et Rawnak,
A mes frères et sœurs et leurs enfants,
A toute la famille grands et petits,
A mes amis, mes voisins, mes collègues du Technicum Besseghier Lakhdar et des
autres lycées,
A nos maîtres d'écoles, nos professeurs de collège, de lycée et nos enseignants de la
faculté des Sciences et de l'ingénieur de l'université Abou Bakr Belkaid Tlemcen et
nos enseignants de l'ensei d'Oran, A tous ceux qui se sont sacrifiés pour notre
instruction et la construction de notre savoir.

MANGOUCI Ahmed

المخلص

الغاية من هذا العمل هو إعداد برمجة أداة مساعدة لاشتراك السطوح بالنقاط الملتزمة بواسطة الجهاز المقارن لمراقبة المواصفات الهندسية الشكلية على القطع المصنعة داخل ورشات الميكانيك بالسلسلة الصغيرة و المتوسطة. تنقسم هذه المذكرة إلى ثلاثة أجزاء أساسية : يتضمن الجزء الأول المواصفات الهندسية للمنتجات (GPS) و مميزات آلة القياس ثلاثية الأبعاد (MMT) مع استكشاف أساليب اشتراك السطوح بالنقاط المقاسة (الملتزمة) الموجودة على هذه الآلات. أما الجزء الثاني فيحتوي على تطبيقات لمراقبة المواصفات الهندسية الشكلية على قطع مشغلة و مختلفة بالطريقة التقليدية التي تخص الاستقامة، الاستواء و الاستدارة بحيث نستعمل زهرة الاستواء كسطح مرجعي أما الجهاز المقارن لأخذ الانحرافات البعدية لمختلف النقاط الملتزمة بالنسبة لمحور القياس و وسائل مشاركة أخرى للمراقبة و قياس إحداثياتها على المحورين الآخرين. كما تراقب هذه القطع بواسطة آلة القياس ثلاثية الأبعاد؛ ونجري مقارنة بين الطريقتين. وأخيرا لتصريح على صحة المراقبة يتضمن الجزء الثالث على دراسة رياضية لمعادلات عناصر هذه الأشكال الهندسية للبحث على اتجاهاتها العامة و المثالية (المفضلة) و على إنشاء برنامج (CAO) خاص لهذه المراقبة يحتوي هذا البرنامج على وظيفتين تتضمن الوظيفة الأولى: إدخال إحداثيات النقاط الملتزمة و مجال السماح المفروض من قبل الرسم التعريفي للقطعة داخل البرنامج بعد الضغط على زر المواصفة الهندسية المناسبة. أما الوظيفة الثانية تشمل معالجة الحسابات بالمربعات الدنيا (Moindres carrés) مع الرسم البياني للعنصر الهندسي المشارك المثالي الذي يمثل مجموع النقاط الحقيقية و تصرح على قبول أو عدم القبول للقطعة.

الكلمات المفتاحية: معايير المشاركة، النقاط الملتزمة، مجموعة من النقاط، العناصر الهندسية الحقيقية والمثالية، معيار افتراضي، تفتيش، مراقبة، فحص، تحقيق للسطوح الهندسية.

Exploration des moyens d'association de surfaces aux points palpés sur machine à mesurer tridimensionnelle.

Résumé : ce travail a pour objectif la conception d'un outil d'aide à la programmation de l'association de surfaces aux points palpés avec le comparateur à cadran pour la vérification des spécifications géométriques de forme des pièces fabriquées dans les ateliers de mécanique de petite et moyenne série.

Ce mémoire a été développé en trois parties essentielles.

La première partie est consacrée aux spécifications géométriques des produits ainsi qu'aux caractéristiques de la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) dont l'exploration des systèmes d'association de surfaces existant aux points palpés sur MMT.

Quant à la seconde partie, elle comporte les applications du contrôle des spécifications de forme concernant la rectitude, la planéité et la circularité sur différentes pièces fabriquées avec la méthode traditionnelle utilisant le marbre comme plan de référence, le comparateur à cadran pour relever les écarts de mesure des points palpés par rapport à un axe de mesure, des instruments associés pour le contrôle et la mesure de leurs coordonnées sur les deux autres axes. Les mêmes pièces ont été également contrôlées par la machine à mesurer tridimensionnelle dans le but d'effectuer une comparaison des résultats entre les deux méthodes.

Enfin pour déclarer la conformité des pièces contrôlées, la troisième partie est consacrée à l'étude mathématique des équations des éléments de ces formes géométriques pour déterminer leurs directions générales optimales et à la conception d'un programme informatique CAO pour leurs vérifications

Ce programme remplit deux fonctions. La première fonction consiste à charger les coordonnées de ces points palpés et l'intervalle de tolérance imposé par le dessin de définition de la pièce après avoir choisi la spécification de forme considérée. La seconde fonction traite les calculs par minimisation des moindres carrés en donnant la représentation graphique de l'élément géométrique idéal associé représentatif de ce nuage de points réels et déclare l'acceptation ou le rejet de la pièce.

Mots clés : *critères d'association, points palpés, nuage de points, éléments géométriques réels et idéals, calibre virtuel, contrôle, identification de surfaces.*

Abstract

Exploration of the means of association of surfaces at the contact points on measuring machine three-dimensional.

Abstract : this work aims at the design of a tool of assistance to the programming of the association of surfaces at the points palpated with the dial gauge for the checking of the geometrical specifications of form of the parts manufactured in the workshops of mechanics of small and average series.

This memory was developed in three essential parts.

The first part is devoted to the geometrical specifications of the products like to the characteristics of the measuring machine three-dimensional (MMT) of which the exploration of the systems existing of association at the points measured on MMT.

As for the second part, it comprises the applications of the control of the specifications of form concerning the straightness, flatness and circularity on various parts manufactured with the traditional method using the marble like datum-line, the gauge dial to raise the variations of measurement of the points palpated compared to an axis of measurement, instruments associated for control and measurement with their co-ordinates on the two other axes. The same parts were also controlled by the measuring machine three-dimensional with an aim of carrying out a comparison between the two methods.

Finally to declare the conformity of the controlled parts, the third part is devoted to the mathematical study of the equations of the elements of these geometrical forms to determine their optimal general directions and to the design of a software CAD for their checks

This software fulfills two functions. The first function consists in charging the co-ordinates of these points palpated and the interval of tolerance imposed by the design drawing of the part after having chosen the specification of form considered. The second function treats calculations by minimization of least squares by giving to the chart of the geometric standard ideal associate representative of this real group of dots and declares the acceptance or the rejection of the part.

Key words: *criteria of association, contact points, group of dots, real geometric standards and ideals, gauges virtual, inspection, control, checking, identification of surfaces*

Liste des figures

Premier chapitre

Figure1-1 : Dessin technique (palier d'un moteur électrique).....	4
Figure1-2 : Eléments nominaux	8
Figure1-3 : Géométrie réelle.....	10
Figure1-4 : Surfaces réelles.....	10
Figure1-5 : Surfaces réelles.....	15
Figure1-6 : Palpage par points.....	15
Figure1-7 : Substitution du réel.....	15

Deuxième chapitre

Figure2-1 : MMT de type col de cygne.....	20
Figure2-2 : Gamme des techniques de mesure tridimensionnelle.....	22
Figure2-3 : Capteur à déclenchement dynamique.....	23
Figure2-4 : Appui cinématique.....	24
Figure2-5 : Longueur de travail effective.....	26
Figure2-6 : Surfaces associées aux points en métrologie tridimensionnelle.....	29
Figure2-7 : Ecart entre réel et nominal.....	30
Figure2-8 : Nuage de points.....	31
Figure2-9 : Palpage du nuage de points.....	34
Figure2-10 : Surface géométrique idéale nominale.....	35
Figure2-11 : Ensemble des points mesurés M_i	36
Figure2-12 : Ensemble des points calculés M_{th_i}	36
Figure2-13 : Surface idéale associée aux points mesurés M_i	37
Figure2-14 : Base de calibres virtuels élémentaires.....	38

Troisième chapitre

Figure3.1: Désignation des points sur la surface (S) de la semelle.....	39
Figure3-2a : Contrôle de la rectitude sur marbre de la semelle.....	40
Figure3-2b : Contrôle de la rectitude sur marbre de la semelle.....	41
Figure3-3 : Contrôle de la rectitude par MMT.....	43
Figure3-4 : Illustration graphique des 22 points palpés et étendue.....	44
Figure3-5 : Contrôle de la rectitude de la glissière.....	45

Figure3-6 : Contrôle de la rectitude de la glissière.....	46
Figure3-7 : Illustration graphique des 31 points palpés de la glissière.....	47
Figure3-8 : Surface à contrôler du palier moteur.....	48
Figure3-9 : Gabarit en carton.....	49
Figure3-10a : Contrôle de la planéité du palier moteur sur marbre.....	50
Figure3-10b: Contrôle de la planéité du palier moteur sur marbre.....	51
Figure3-11 : Contrôle de la planéité du palier sur MMT.....	53
Figure3-12 : Contrôle de la planéité du palier sur MMT.....	54
Figure3-13 : Illustration graphique des points palpés du 3 ^{ème} essai.....	57
Figure3-14 : Contrôle de la circularité du roulement.....	58
Figure3-15 : Répartition du nuage de points de la circularité et étendue.....	61

Quatrième chapitre

Figure4-1 :Droite associée de la rectitude.....	65
Figure4-2 : Plan associé de la planéité.....	71
Figure4-3 : Cercle associé de la circularité.....	75

Cinquième chapitre

Figure5-1 : Démarche métrologique.....	80
Figure5-2 : Organigramme général du contrôle de surfaces.....	81
Figure5-3 : Page d'accueil (palette).....	82
Figure5-4 : Rubriques d'aide.....	83
Figure5-5 : Fenêtre de saisie des coordonnées des points palpés.....	83
Figure5-6 : Saisie obligatoire.....	84
Figure5-7 : Nombre de valeurs saisies dans le champ Z.....	84
Figure5-8 : Coordonnées et intervalle de tolérance de la pièce semelle.....	85
Figure5-9 : Elément géométrique associé et son équation.....	85
Figure5-10 : Pièce acceptée avec IT = 0.065 mm (rectitude).....	87
Figure5-11: Pièce acceptée avec IT =0.015 mm (rectitude).....	88
Figure5-12: Pièce rejetée avec IT = 0.0108 mm (rectitude).....	89
Figure5-13: Pièce acceptée IT =0.02 mm (planéité).....	90
Figure5-14: Pièce acceptée avec IT = 0.0122 mm (planéité).....	92
Figure5-15: Pièce rejetée avec IT = 0.0087 mm (planéité).....	92
Figure5-16: Pièce acceptée avec IT = 0.01 mm (circularité).....	93
Figure5-17: Pièce rejetée avec IT = 0.007 mm (circularité).....	95

Liste des tableaux

Premier chapitre

Tableau 1.1 : classes d'invariance.....	6
Tableau 1.2 : Eléments simples.....	7
Tableau 1.3 : Eléments de situation.....	9
Tableau 1.4 : Résumé et correspondance des normes actuelles.....	12

Deuxième chapitre

Tableau 2.1 : Force de déclenchement.....	25
Tableau 2.2 : Nombre de points palpés.....	31
Tableau 2.3 : Critères d'association déduits de la norme ISO 5459	32
Tableau 2.4 : Possibilité offertes par les cinq principaux critères.....	34

Troisième chapitre

Tableau 3.1 : Ecart de mesure de la rectitude de la semelle.....	41
Tableau 3.2 : Défauts de forme de la rectitude de la semelle.....	42
Tableau.3.3. Moyennes des écarts de mesure de la rectitude de la semelle.....	42
Tableau 3.4 : Coordonnées des points de la rectitude de la semelle	43
Tableau 3.5 : Ecart de mesure et abscisses des points en x de la glissière.....	45
Tableau 3.6 : Défauts de forme de la rectitude de la glissière.....	45
Tableau.3.7. Moyennes arithmétiques des écarts de mesure de la rectitude de la glissière	46
Tableau 3.8 : Coordonnées des points de la rectitude de la glissière(1 ^{ère} mesure).....	47
Tableau 3.9 : défauts de rectitude de la glissière.....	48
Tableau 3.10 : Ecart de mesure de la planéité.....	51
Tableau 3.11 : Défauts de forme de la planéité.....	52
Tableau.3.12 : Moyennes arithmétiques des écarts de mesure de la planéité.....	52
Tableau 3.13 : Listing des coordonnées des points palpés du premier balancement.....	53
Tableau 3.14 : Listing des coordonnées des points palpés du second balancement	54
Tableau 3.15 : Listing des coordonnées des points palpés du troisième balancement.....	55
Tableau 3.16 : Défauts de forme de planéité	55
Tableau 3.17 : Compte rendu des résultats de la planéité.....	56
Tableau 3.18 : Défauts de planéité.....	56
Tableau 3.19 : Ecart de mesure de la circularité du roulement.....	59
Tableau 3.20 : Défauts de forme de la circularité.....	59

Tableau.3.21. Moyennes arithmétiques des écarts de mesure de la circularité (en micron).....	60
Tableau 3.22 : Coordonnées des points de la circularité.....	60
Tableau.3.23. Défauts de circularité.....	61
Tableau 3.24 : Récapitulatif des résultats.....	62

Liste des abréviations

ANSI :	American Standard Code for Information Interchange
CAO :	Conception Assistée par Ordinateur
CFAO :	Conception et Fabrication Assistée par Ordinateur
DAO :	Dessin Assisté par Ordinateur
DEA :	
ERGM :	Elément de Référence Géométrique Minimum
FAO:	Fabrication Assistée par Ordinateur
GPS :	Geometrical Product Specification
IGES:	Initial Graphic Exchange Specification
ISO:	International Standard Organization
MMT:	Machine à Mesurer Tridimensionnelle
NF, AFNOR:	Norme Française
OM :	Origine Machine
Om :	Origine de mesure
OP:	Origine Pièce
PME :	Petite et Moyenne Entreprise
SATT:	Surfaces Associées Technologiquement et Topologiquement
SPC	Statistical Process Control
STEP:	Standard for Exchange of Product model data
UMM:	

INTRODUCTION

Les logiciels associés aux machines à mesurer tridimensionnelles assurent la fonction d'association de surfaces aux points palpés sur les pièces, c'est à dire celle qui permet de déterminer les coordonnées des points de contact entre le palpeur et la surface à mesurer et par un traitement mathématique de ces coordonnées effectuer des mesures dimensionnelles entre des éléments géométriques associés à des points de mesure et de vérifier aussi les caractéristiques des spécifications géométriques des pièces.

Après usinage, les surfaces ou les lignes réelles des pièces n'étant jamais parfaites les points palpés ne peuvent pas tous appartenir à l'élément géométrique idéal recherché. L'association d'un élément géométrique idéal à un ensemble de points ou nuage de points devra donc répondre au critère d'optimisation de la «meilleure représentation» de l'élément géométrique réel.

En effet, une bonne connaissance des surfaces et des lignes réelles impose qu'elles soient palpés par un nombre de points supérieur au nombre de points minimal, nécessaire et suffisant à la définition mathématique de l'élément géométrique idéal correspondant qui est la géométrie nominale.

Ce travail a pour but l'étude de la non répétitivité des résultats obtenus du contrôle des spécifications géométriques de forme par la méthode traditionnelle et la conception d'un outil didactique d'aide à la programmation de l'association des éléments géométriques pour la vérification de ce contrôle dans les ateliers de mécanique.

Ce mémoire est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré aux spécifications géométriques des produits et présente les concepts du tolérancement macro-géométriques. Son objectif est de faire comprendre au lecteur la nécessité de distinguer les géométries réelles et nominales des produits. La géométrie avec défaut implique une modélisation pour aboutir à l'association d'un élément géométrique réel d'une pièce.

Le deuxième chapitre est consacré à une introduction sur la métrologie, au développement de la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), aux critères d'association de surfaces aux points palpés sur MMT et enfin le contrôle virtuel sur MMT.

Le troisième chapitre traite les applications de contrôle de deux pièces différentes sur la rectitude, une pièce sur la planéité et une autre sur la circularité par la méthode traditionnelle et par la machine à mesurer tridimensionnelle. Une comparaison des résultats est faite entre les deux méthodes pour aboutir à la nécessité de l'association de surfaces aux points palpés qui sera notre but au chapitre IV et V.

Le quatrième chapitre consiste à l'étude du modèle mathématique des équations des trois éléments : droite, plan et cercle dont on recherche leurs éléments géométriques idéaux associés par la méthode des moindres carrés.

Le cinquième chapitre est consacré à la conception d'un outil d'aide à la programmation de l'association de surfaces pour la vérification des spécifications de forme. Il permet la déclaration de l'acceptation ou le rejet de la pièce par la représentation graphique de l'élément géométrique idéal associé relatif au type de l'élément considéré. Le chargement des coordonnées des points palpés par le comparateur se fait manuellement ou à partir d'un fichier déjà existant.

Enfin, en annexes, les tolérances géométriques, les vérifications géométriques et les rapports de contrôle des pièces suivantes : semelle, glissière et roulement du Laboratoire de Métrologie ENSET d'Oran.

CHAPITRE 1

Spécifications Géométriques des Produits (GPS)

1.1. Introduction

La création des produits passe par la définition géométrique des pièces qui les constituent. Cette définition est aujourd'hui le moyen de véhiculer l'information nécessaire à tous les acteurs des entreprises. Elle s'appuie sur une représentation graphique conventionnelle des formes idéales, le dessin technique représenté par la figure.1.1 et sur un langage graphique d'expression des limites admissibles de variation de la géométrie des pièces réelles, le tolérancement. L'élaboration de ce dernier s'appuie sur les connaissances des bureaux d'études, de méthodes et de contrôle.

Le tolérancement exprime les conditions de bon fonctionnement des produits, permet de déterminer les meilleurs processus de réalisation et constitue le cahier des charges de la conformité des produits.

La preuve en est que les machines à mesurer tridimensionnelles de plus en plus utilisées sont dotées de logiciels de traitement des mesures adaptés à la mesure dimensionnelle et rarement au tolérancement. De ce fait, il arrive de qualifier des pièces mauvaises alors qu'elles sont bonnes et des pièces bonnes alors qu'elles sont mauvaises.

Ce constat n'est pas nouveau, mais il est récent [BOU 98]. Aux Etats-Unis, depuis, 1989, des équipes d'universitaires et d'industriels travaillent sur le sujet. En Europe, la communauté économique européenne a lancé des projets ponctuels dans le domaine de la métrologie tridimensionnelle pour étudier la qualité mesurante des machines et pour vérifier les algorithmes d'identification des surfaces géométriques simples. La commission de normalisation européenne sous l'impulsion des Danois et des Allemands travaille également dans ce sens en rapprochant les experts du dessin technique et de la métrologie dimensionnelle pour élaborer des normes cohérentes. C'est de là, qu'est né le concept GPS (Geometrical Product Specification) maintenant adopté par l'ISO [AUB 99].

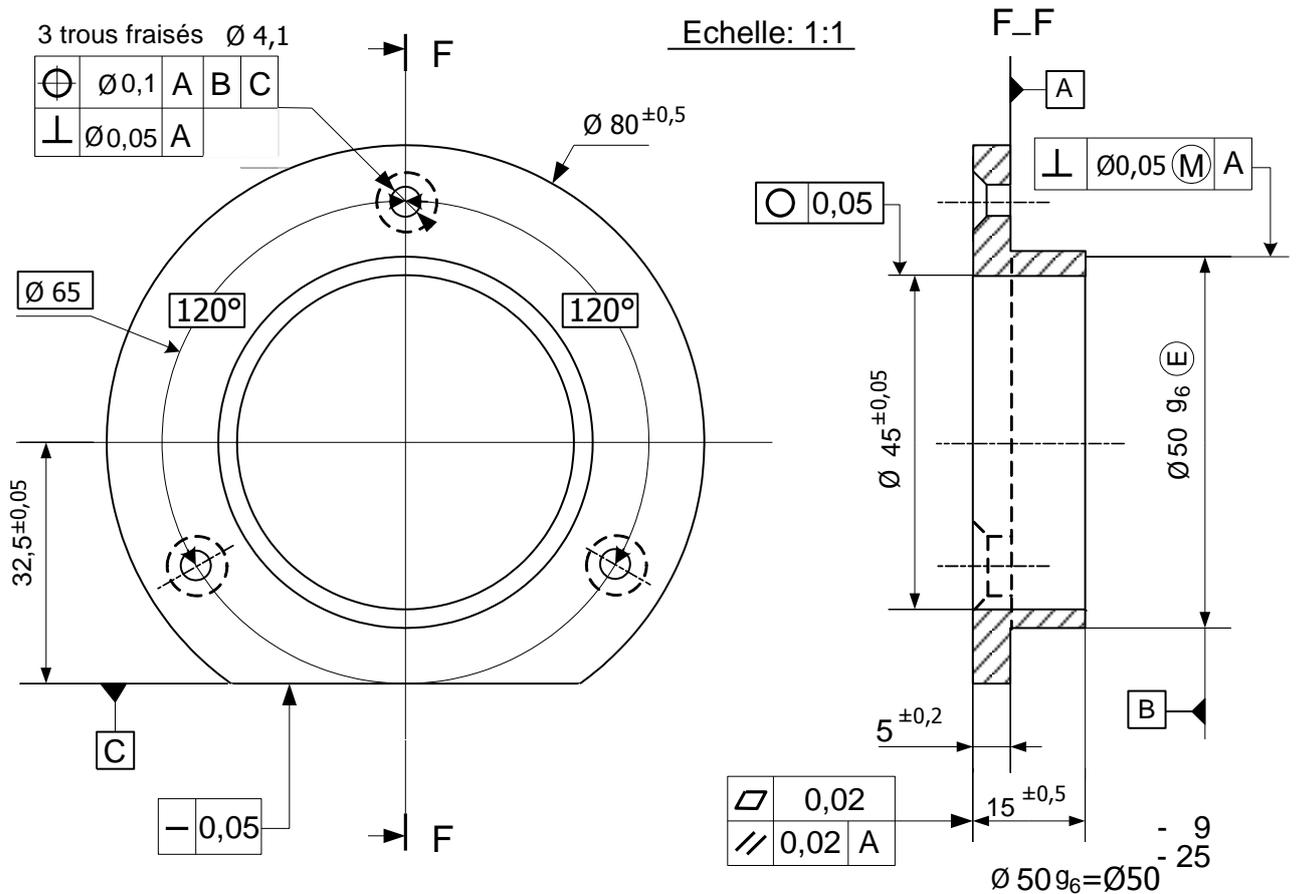


Fig.1.1. Dessin technique (palier d'un moteur électrique)

1.2. Concepts du tolérancement macro-géométrique

1.2.1 Géométrie nominale

La géométrie nominale définit la forme idéale des pièces. Elles suivent les règles de définition mathématique des surfaces, des lignes et des points qui sont exprimés dans un repère de définition.

La définition de la géométrie nominale est réalisée à l'aide de modèles géométriques permettant de construire des formes de pièces en 3 dimensions.

La géométrie nominale des pièces est celle que manipule le dessinateur pendant la phase de conception. Elle est représentée de manière conventionnelle par le « dessin technique » (sans le tolérancement et les spécifications).

Elle est constituée de la définition de l'ensemble des surfaces idéales de la pièce, des lignes et des points particuliers de ces surfaces.

On utilisera le vocable d'éléments géométriques pour la désignation de ces objets géométriques participant à la définition de la pièce.

Les éléments idéaux constituant la géométrie nominale d'une pièce sont qualifiés d'éléments nominaux.

Les éléments nominaux et les valeurs des paramètres qui les caractérisent, constituent le modèle de la géométrie nominale de la pièce [BAL 93].

1.2.1.1 Classes d'invariance

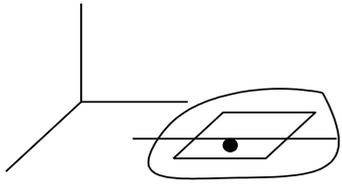
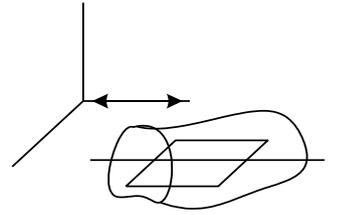
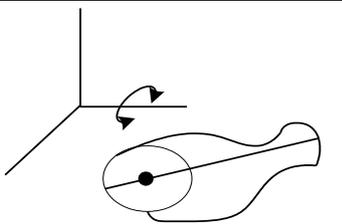
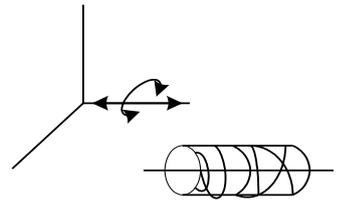
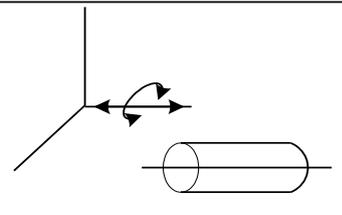
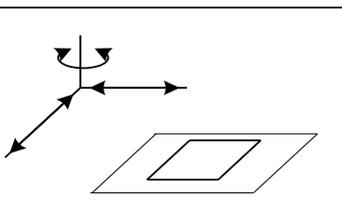
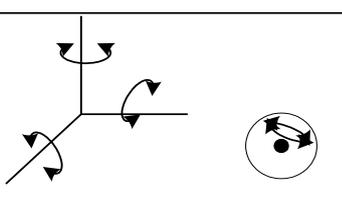
Tous les éléments géométriques utilisés en mécanique peuvent être regroupés en sept classes [HER 76] , [CLE 91] suivant les degrés de liberté qui les laissent invariants en forme et en situation dans l'espace de description. Le tableau .1.1 précise les degrés d'invariance pour chaque classe.

Les classes correspondantes sont appelées «*classes d'invariance ou modèle SATT (Surfaces Associées Technologiquement et Topologiquement)*» [CLE 94].

A chaque classe d'invariance de SATT, on définit des éléments géométriques de référence minimum (EGRM) [DES 91] formant eux mêmes un SATT de la même classe d'invariance, composés seulement des trois éléments point, droite et plan.

Par exemple un SATT cylindre aura comme élément de référence son axe, un SATT formé de deux plans parallèles aura comme élément de référence son plan médian, et un SATT composé de 6 cylindres d'axes parallèles aura comme éléments de référence un plan et une droite du plan etc... La notion classique d'axe d'un cylindre est ainsi étendue aux sept classes de SATT.

Tableau 1.1. Classes d'invariance

Classes d'invariance	Degrés d'invariance	Degrés d'invariance	Eléments géométriques de référence minimum (EGRM)	Illustrations des degrés d'invariance
Quelconque	0	Aucun	plan droite point	
Prismatique	1	Une translation le long d'une droite d'un plan	plan droite	
Révolution	1	Une rotation autour d'une droite	droite point	
Hélicoïdale	1	Une translation et une rotation liées	Droite orientée	
Cylindrique	2	Une translation et une rotation autour d'une droite	droite	
Plane	3	Une rotation perpendiculaire au plan et deux translations le long de deux droites du plan	plan	
sphérique	3	Trois rotations autour d'un point	point	

1.2.1.2 Eléments simples

Les éléments couramment rencontrés en mécanique de nature surfacique tels qu'un plan, un cylindre, un cône, une sphère, un tore, ceux de nature linéique tels qu'une droite, un cercle, une ellipse, une hélice et enfin le point de nature ponctuel.

Compte tenu de la généralité de la classification, nous définissons une famille d'éléments qui ne peuvent être décomposés et que nous appelons éléments simples donnés par le tableau.1.2.

Tableau .1.2. Eléments simples

ELEMENTS SIMPLES			
Type	Nature	Classe d'invariance	Paramètres intrinsèques
- plan	surfacique	plane	aucun
-droite -cylindre de révolution	linéique surfacique	cylindrique	aucun diamètre
-cercle -cône -tore -...	linéique surfacique surfacique	révolution	diamètre angle au sommet diamètre de la gé- -ratrice, diamètre de la directrice
-point -sphère	ponctuelle surfacique	Sphérique	aucun diamètre
-prisme à base elliptique -prisme à base de déve- loppante de cercle -...	surfacique surfacique	prismatique	petit axe, grand axe angle de pression, rayon de base
-hélice -hélicoïde à base de développante de cercle -...	linéique surfacique	hélicoïdale	pas de l'hélice, diamètre angle de pression, rayon de base, angle d'hélice
-ellipse -surface à pôles -...	linéique surfacique	quelconque	petit axe, grand axe distances relatives des pôles

1.2.1.3 Formes des éléments nominaux

La définition de la forme d'un élément est caractérisée par son type et par la valeur du (ou des) paramètre(s) intrinsèque(s) de l'élément.

Une propriété intrinsèque d'un élément est une propriété propre à cet élément. Cette propriété peut être définie complètement sans faire appel à aucun élément extérieur à l'élément considéré.

La géométrie de la pièce de la figure.1.2 est constituée de plans (PL) et de cylindres (CY) appartenant respectivement à la classe plane et cylindrique. Chaque cylindre à un paramètre intrinsèque, son diamètre et les plans n'en ont pas.

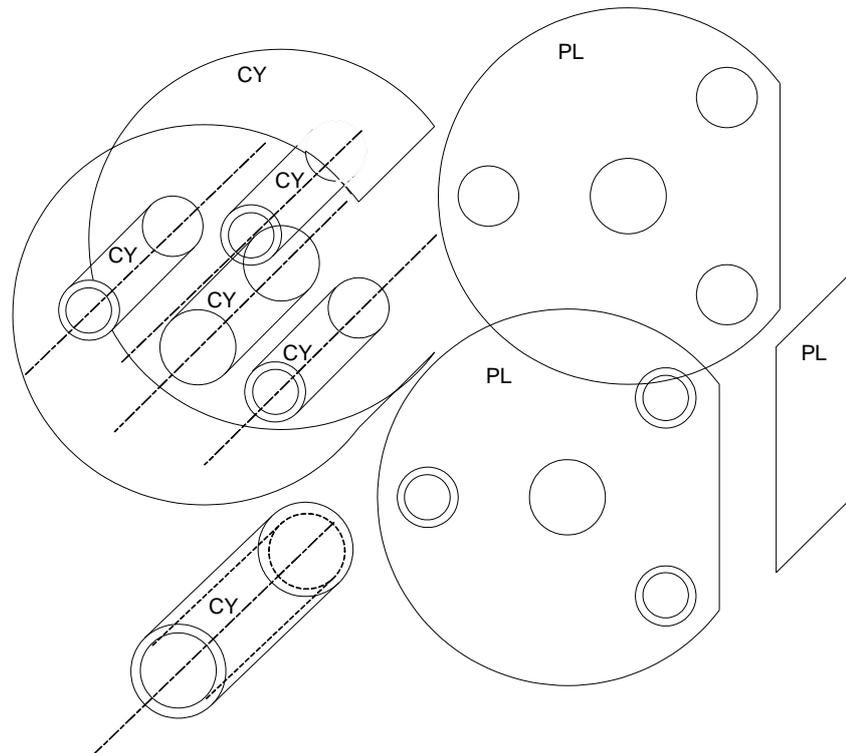


Fig .1.2.Eléments nominaux

1.2.1.4 Situation relative ou positionnement des éléments nominaux

La définition de la situation relative des différents éléments constituant une pièce est donnée par la valeur du (ou des) paramètre(s) de position et d'orientation relative des éléments.

Les paramètres de position représentent des longueurs et les paramètres d'orientation représentent des angles. La définition de chacun de ces paramètres s'appuie sur des éléments caractéristiques de chaque élément appelés éléments de situation ou éléments géométriques de référence minimum (EGRM) de type point, droite, plan et hélice.

Pour les sept classes d'invariance, les éléments de situation sont définis sur le tableau.1.3.

Tableau .1.3. Eléments de situation

ELEMENTS DE SITUATION		
Type	Classe d'invariance	Exemples d'éléments géométriques de référence minimum (EGRM)
- plan	plane	Le plan
-droite -cylindre de révolution	cylindrique	La droite La droite , axe du cylindre
- cercle - cône - tore - ...	révolution	Le plan contenant le cercle et le point centre du cercle ou, Le point centre du cercle et la droite perpendiculaire au plan contenant le cercle. La droite , axe du cône et le point , sommet ou un plan perpendiculaire à l'axe et le point intersection de l'axe et du plan. Le plan contenant la directrice et le point centre de la direction ou, La droite , axe du tore et le point intersection de la droite avec le plan de la direction.
-point -sphère	Sphérique	Le point Le point , centre de la sphère
- prisme à base elliptique - prisme à base de développante de cercle - ...	prismatique	Un plan , perpendiculaire au plan de définition de l'ellipse contenant le grand axe et une droite également perpendiculaire passant par le centre de l'ellipse. Un plan contenant l'axe du cylindre de base et passant par un point de la développante et une droite , l'axe du cylindre de base.
-hélice -hélicoïde à base de développante de cercle -...	hélicoïdale	l'hélice elle même l'hélice de définition de l'hélicoïde
- ellipse - surface à pôles -...	quelconque	Le plan contenant l'ellipse, la droite grand axe et le point centre de l'ellipse Un plan , une droite et un point de définition des pôles ou, Trois plans orthogonaux.

Le positionnement relatif de deux classes de surfaces se fera par les paramètres de distance et d'angle liant entre eux les ERGM des deux classes, c'est-à-dire des paramètres entre des points des droites et des plans.

1.2.2 Géométrie réelle

Les pièces d'un ensemble mécanique constituent chacune un volume limité par une surface résultante d'un ou de plusieurs procédés d'obtention des formes. La surface matérielle ainsi obtenue n'est pas atteignable en théorie et il est utile d'en avoir *une modélisation*.

La géométrie réelle d'une pièce peut être définie par la surface qui sépare la matière de la pièce de son environnement. Une modélisation possible de la géométrie réelle d'une pièce est de considérer une définition de la surface réelle de la pièce par une infinité de points. Le modèle correspondant sera appelé modèle de la géométrie réelle représentée par la figure.1.3.

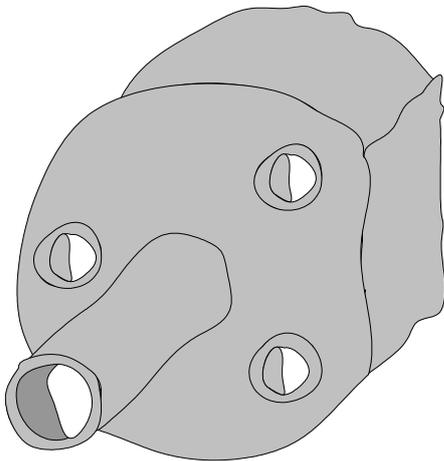


Fig .1.3. Géométrie réelle

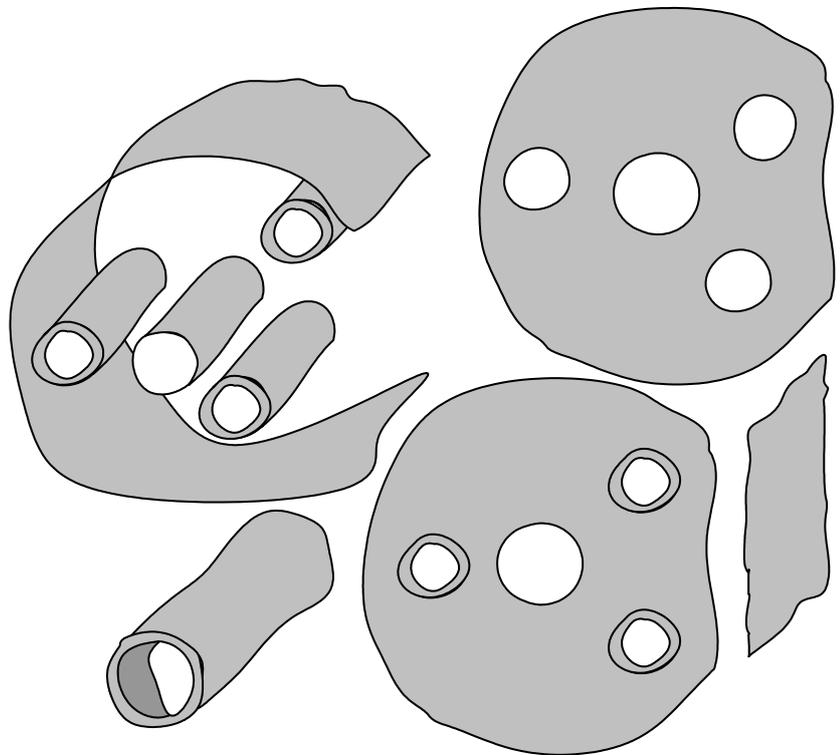


Fig .1.4. surfaces réelles

Ses différentes parties sont appelées surface réelles illustrées par la figure.1.4.

Chaque surface réelle correspond à une surface idéale dont la forme géométrique peut-être définie mathématiquement.

L'ensemble des surfaces idéales correspondant aux parties de la surface réelle de la pièce en situation théoriquement exacte définit la géométrie idéale de cette pièce appelée géométrie nominale.

1.2.3 Géométrie avec défauts

La géométrie avec défauts est définie par une géométrie nominale, une modélisation du « réel » et une limitation des défauts du réel par le "Tolérancement" des écarts entre la géométrie nominale et la représentation du réel.

Le Tolérancement est un moyen d'exprimer et de maîtriser la géométrie réalisée des pièces en vue de garantir la satisfaction du besoin fonctionnel exprimé par le client. Il est également le support de la communication technique dans l'entreprise entre les différents acteurs du cycle " Conception - Fabrication - Contrôle".

1.2.3.1. Analyse des normes

A l'heure où la maîtrise de la qualité est le mot d'ordre de l'entreprise et où la notion de zéro défaut prévaut dans la réalisation des produits, le dialogue entre les responsables de la conception, de la réalisation et du contrôle doit s'instaurer efficacement. Les exigences sur le produit sont définies au bureaux d'études. Elles doivent être transmises sans ambiguïtés aux services fabrications et métrologie

Actuellement, parmi les documents permettant de véhiculer ces informations, le dessin du produit sur papier ou son équivalent en CAO 2D ou 3D figure en première place. Il est essentiel que les codes et les règles du langage graphique utilisés soient parfaitement définis. Aucune variation d'interprétation ne doit être introduite à la lecture. Aussi, des normes régissent l'expression et l'interprétation des documents. Elles étaient au nombre de 7 en 1928, passées à 21 en 1987, elles sont 60 en 1999 (projets confondus) [SEL 99]. Ces chiffres montrent en particulier que les dessins sont devenus de plus en plus complexes. De plus en plus de règles et de conventions sont exploitées pour limiter les ambiguïtés d'interprétation.

Actuellement, le concepteur dispose d'un langage normalisé qui comporte un certain nombre de symboles graphiques. Les normes Françaises (NF) actuelles ou internationales (ISO), traitent de la spécification de la macro-géométrie des surfaces réelles par rapport à un modèle, en s'appuyant sur :

- Les tolérances dimensionnelles normes [ISO 129],[ISO 406] et [ISO 8015]
- Les tolérances géométriques normes ISO[8015],[1101],[5459],[5458],[3040],[1660] et[2692]
- Le principe de l'indépendance
- Les exigences de l'enveloppe et du maximum de matière.

Les spécifications par tolérances géométriques suivent les règles suivantes :

- Sans modificateurs (tolérancement par zones de tolérances)
- Avec modificateurs (tolérances projetées, tolérances au Maximum ou au Minimum de matière)

On peut établir une relation entre les tolérances dimensionnelles et les tolérances géométriques, en utilisant l'exigence du maximum de matière  et dans les seuls cas du cylindre et de l'union de deux surfaces planes parallèles.

Les normes définissent un principe et des exigences pour le tolérancement [AUB 99] qui établissent des relations entre les différents types de tolérances dimensionnelles, de forme d'orientation et de position. Le tableau.1.4 présente un résumé et correspondances des normes actuelles.

Tableau .1.4. Résumé et correspondances des normes actuelles [SEL 99]

Principe et exigences	Références	Symboles	Observations
Exigence du maximum de Matière	NF E 04-555 ou ANSI Y 14.5 M	M	
Exigence du minimum de Matière	ANSI Y 14.5 M ISO 2692	L	A l'étude dans le normes ISO
Exigence de l'enveloppe	NF E 04-541 ISO 8015	E	Aucun équivalent dans la norme ANSI
Principe de l'indépendance	NF E 04-561 ANSI Y 14.5 M	S	Pas de symbole en ISO
Etat virtuel	NF E 04-560 ANSI Y 14.5 M	- -	
Zone de tolérance projetée	NF E 04-558 ANSI Y 14.5 M	P P	

1.2.3.2. Expression de la limitation des écarts par les normes de spécification ISO

Les normes ISO proposent des règles graphiques permettant de spécifier la "géométrie réelle" des pièces. Ces règles ont été élaborées au cours du temps, elles traduisent un état de la l'art formulé par différents groupes de travail constitués d'industriels et d'universitaires [BOU 98]. Les normes sont donc en perpétuelle évolution, néanmoins il est possible d'en extraire les principaux concepts. Les exigences sont exprimées sous la forme de deux types de tolérances :

- *Les tolérances dimensionnelles* : portent sur des grandeurs de type longueur ou angle, c'est pourquoi l'on distingue, les tolérances linéaires et les tolérances angulaires [ISO 8015].

- Les tolérances géométriques (*tolérancement par zones*) sans indications particulières elles définissent :

- Des éléments géométriques réels extraits de la "peau" de la pièce:
 - *les éléments tolérancés* et
 - *les éléments de références*
- Des éléments géométriques idéaux **associés** aux éléments de références :
 - *une référence spécifiée simple, commune, ou un système de référence spécifiées.*

- *Les zones de tolérance*

Sont des espaces de nature volumique ou surfacique limités respectivement par un ou plusieurs éléments géométriques idéaux nature surfacique ou linéique.[ISO1101],[ISO1660],[ISO 2692],[ISO 3040] et [ISO 5458]. La zone de tolérance est qualifiée de :

- *unique*, si elle est appliquée à un seul élément tolérancé,
- *composée*, si elle est appliquée à un groupe d'éléments tolérancés.

Les zones de tolérances peuvent être contraintes géométriquement en orientation ou en position par rapport aux *références spécifiées*. Il est ainsi possible de définir suivant les contraintes imposées aux zones de tolérance quatre types de tolérance géométrique : forme, orientation, position et battement. (voir annexes)

1.2.4. Modélisation des formes géométriques d'une pièce (éléments tolérancés et de références)

La modélisation des formes géométriques s'appuie sur les bases de la géométrie euclidiennes, aussi nous conserverons le vocabulaire traditionnel ou les mots droite, plan, sphère, cylindre, cône et tore désignent des surfaces et des lignes d'étendue infinie et de forme idéale.

La modélisation géométrique d'une pièce revêt deux aspects, une modélisation de la forme idéale définie par un dessin ou tout autre moyen informatique et une modélisation de la forme réelle créée par un procédé de fabrication.

1.2.4.1. Modélisation des éléments géométriques idéaux nominaux

La forme géométrique idéale d'une pièce est déterminée par des surfaces géométriques nominales qui les délimitent, elles répondent à des critères géométriques particuliers traduits implicitement par les normes du dessin technique ou tout autre moyen informatique. En effet les surfaces nominales sont en général parallèles ou perpendiculaires à des directions privilégiées, et elles répondent à des règles de raccordement, de tangence, d'intersection etc... La nature de chaque surface est implicitement reconnue par l'expérience de "l'homme de métier". Les positions relatives entre les éléments géométriques nominaux sont définies par des dimensions.

Elle suit les règles de définition mathématique des surfaces, des lignes et des points qui sont exprimés dans un repère de définition.

1.2.4.2. Modélisation des éléments réels

Les éléments réels peuvent être définis comme étant l'interface entre la matière et son environnement.

la modélisation de la forme réelle est créée par un procédé de fabrication.

Trois modélisations du réel sont classiquement utilisées :

- *1^{ère} modélisation* : par un nombre infini de points. Cette modélisation appelée *skin modèle* désigne de la façon la plus générale possible la surface réelle « la peau » de la pièce. Les surfaces réelles sont définies par les interfaces matière environnement voir la figure.1.5.

- *2^{ème} modélisation* : par un nombre fini de points. Ces points sont définis dans un repère par des coordonnées obtenues par un capteur avec une incertitude sur chaque point. Les points peuvent être regroupés par " paquets " correspondant aux différentes formes élémentaires de la pièce, la notion de frontière permet de trier les points. Ce sont les points mesurés représentatifs des surfaces réelles. Ils sont déduits des points saisis par décalage du rayon du palpeur voir la figure.1.6.

- *3^{ème} modélisation* : les "paquets de points" sont lissés par des modèles géométriques théoriquement exacts, le réel est représenté par un assemblage d'éléments de substitutions (surfaces idéales limitées par des contours). Ce sont des surfaces parfaites, limitées par un contour, ayant des défauts d'orientation et de position par rapport aux surfaces nominales, elles passent aux mieux des points mesurés suivant le critère des moindres carrés et peuvent être tangentes du côté libre de la matière voir la figure.1.7.



Fig .1.5. Surfaces réelles

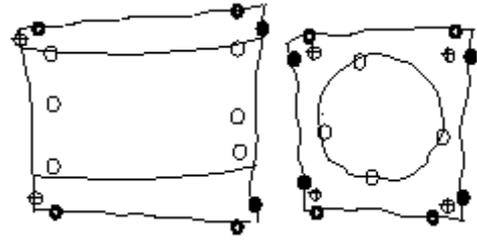


Fig .1.6. Palpage par points

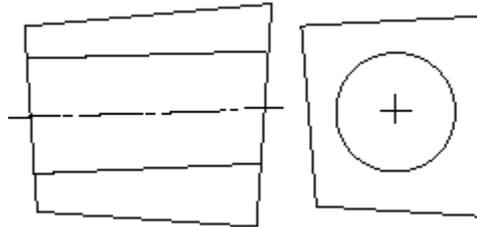


Fig .1.7. Substitution du réel

1.2.5. Les approches développées pour l'intégration CFAO

Pour l'établissement d'une tolérance assistée par ordinateur (Computer Aided Tolerancing) [BJO 89], on rencontre des travaux de recherche qui s'orientent principalement sur :

- la modélisation du tolérancement (modèles pour la spécification) [BOU 95]
- l'analyse et/ou la synthèse du tolérancement (simulation) [CHA 88].

Nombre de ces travaux sont actuellement en cours de développement et différents concepts ont été développés en se basant sur :

- la notion du torseur des petits déplacements [BOU 76]
- une approche statistique et cinématique [DEL 92] , [LER 92]
- une approche probabiliste [TUR 87]
- une approche systémique [LIN93], [LIN 96].

1.3. Conclusion

Le concept des spécifications des produits (GPS) est la liaison existante entre la conception d'un produit et sa métrologie.

La géométrie nominale définit la forme idéale des pièces suivant des règles mathématiques des surfaces, des lignes et des points.

La géométrie réelle des pièces est définie par un ou plusieurs procédés d'obtention de ses formes.

Le tolérancement des écarts entre la géométrie nominale et réelle des pièces constitue le moyen de la limitation des défauts du réel. Ce tolérancement suit les normes internationales (ISO) et françaises (NF) actuelles.

Cette tolérance s'exprime entre la modélisation des éléments idéaux nominaux et la modélisation des éléments idéaux associés des points palpés de la surface réelle de la pièce.

L'identification géométrique des surfaces simples se repose sur une représentation graphique permettant de spécifier la géométrie réelle des pièces par des éléments idéaux associés.

Nous explorons au chapitre suivant les caractéristiques de la machine à mesurer tridimensionnelle et les critères d'association de surfaces existant aux points palpés.

CHAPITRE 2**Machine à mesurer tridimensionnelle MMT****2.1. Introduction**

Actuellement, plusieurs méthodes sont utilisées pour les mesures. La plus simple consiste à disposer de trois déplacements généralement composés de deux horizontaux et un vertical. Le palpeur vient en contact avec chaque point dans les cotes sont à mesurer, et les résultats du palpement sont enregistrés par différents procédés. Dans la plupart des cas un système d'enregistrement est prévu pour chaque cote. Les dispositifs Renault et DEA (italien) répondent à ces conditions. Chacun de ces appareils utilise des dispositifs semblables dans leurs principes mais différents dans leurs réalisations. C'est ainsi que l'adoption des tables à coussin d'air s'est généralisée.

De même, le palpement qui présente des difficultés, s'il s'agit de pièces complexes, comprend deux à trois touches dont chacune peut être orientée de manière à palper la surface de contact normalement. On signalera, à toutes fins utiles, que DEA a créé sous des lettres grecques (alpha, iota, omicron) des modèles de dimensions croissantes, le plus grand pouvant contrôler des pièces telles que des voitures automobiles.

Zeiss a examiné le problème sous une autre forme, avec l'idée de contrôler des pièces spécialement complexes, telles que des engrenages ou des filetages. Le palpement, qui prend dans ce genre de mesure une importance capitale, est obligatoirement assuré par plusieurs palpeurs, trois en général, dont les têtes sont orientables. Pour la mesure elle-même, il convient de tracer réellement ou fictivement, sur la pièce, les lignes sur lesquelles les opérations de palpement doivent s'effectuer ; les résultats des trois dimensions de chaque palpement ainsi obtenus permettent de reporter sur un plan les cotes que l'on peut comparer aux cotes théoriques que doit avoir la pièce mesurée.

Mais Zeiss estime que grâce à cette méthode de nombreuses améliorations ont pu être obtenues dans la fabrication des engrenages.

Le développement de la métrologie, depuis les appareils simples jusqu'aux dispositifs presque monumentaux donnant simultanément toutes les indications d'un contrôle, et sans aucun doute un phénomène irréversible[SAL 80].

2.2. Développement de la machine à mesurer tridimensionnelle

2.2.1. Historique

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

1962: la société italienne *DEA* met au point la première Machine à Mesurer Tridimensionnelle dans un garage de Borgo San Paolo près de Turin. Dix ans plus tard, la société *Carl Zeiss* présente l'UMM500: équipée d'un palpeur universel, d'un calculateur et d'une commande numérique, elle marque une évolution fondamentale dans ce qui fait aujourd'hui la MMT moderne, telle que nous la connaissons. Bien entendu, depuis les années 70 ces machines ont largement évolué que ce soit sur le plan mécanique, électronique et informatique, mais le principe reste le même: un capteur à déclenchement ou statique permettant de mesurer un point sur n'importe quel type de surface, un outil informatique autorisant des calculs puissants pour le calcul de côtes et l'édition de résultats facilement exploitables. Nous devons l'invention du premier palpeur à déclenchement en 1970 à un anglais, David Mac Murtry, ingénieur chez Rolls-Royce. Trois ans plus tard, il fonde, avec M. John Deer, la société *Renishaw*, afin de produire ce palpeur de façon industrielle.

2.2.2. Principe

Constituées en général de trois axes de mesure montés en séries, un palpeur est fixé à l'extrémité du dernier axe [BOU 99a]. Il est possible de relever les trois déplacements du palpeur et par suite de déduire après calcul les trois coordonnées x,y,z du point de contact entre le palpeur et la surface à mesurer.

Les machines à mesurer tridimensionnelles ou par coordonnées appelées (MMT) sont basées sur un principe simple. A l'aide de règles de mesure de haute précision placées sur les différents guidages d'une machine, on relève des coordonnées d'un palpeur qu'on vient de mettre en contact avec la surface d'une pièce à mesurer.

Les logiciels associés aux machines à mesurer assurent de nombreuses fonctions, l'apprentissage et l'exécution de gamme de contrôle, la commande numérique des déplacements de palpeurs suivant des trajectoires prédéfinies, le traitement statique des résultats de mesures obtenu sur une série de pièces, la compensation numérique des défauts géométriques de la machine.

2.2.3. Les différentes morphologies des machines à mesurer tridimensionnelles

2.2.3.1. Machine de type portique

C'est la configuration la plus répandue (90% des machines), elle a une grande capacité, accepte une charge importante et a l'avantage d'une grande facilité d'accès pour la mise en place des pièces. Utilisée pour le contrôle de pièces mécaniques demandant une grande précision (quelques micromètres).

2.2.3.2. Machine de type trusquin (ou bras horizontal ou potence)

Cette configuration est la plus répandue après celle des machines de type portique. Elle est principalement utilisée dans les ateliers de tôleries, ou en production comme robot de mesure. Elle est conçue avec une structure légère en aluminium, ce qui permet des accélérations et des vitesses de déplacement élevées, pour la vérification de pièces de grand volume mais aux tolérances larges (plusieurs centièmes à quelques dixièmes de millimètres).

2.2.3.3. Machine de type col de cygne

C'est la configuration la plus ancienne voir la figure.2.1. La charge est limitée et les courses suivant les axes y et z restent faibles du fait des porte-à-faux.

(Cette machine se trouve au Laboratoire de Métrologie de l'ENSET d'Oran est utilisée pour nos applications de contrôle des spécifications géométriques au chapitre III)

2.2.3.4. Machine de type pont mobile.

De configuration équivalente à un pont roulant. Elle a des capacités de plusieurs mètres (16m, 6,35m, 4,07m pour la machine Lambda de DEA), et elle accepte des charges importantes. Utilisée pour la vérification de pièces volumineuses et lourdes toujours dans des gammes de précisions élevées.

2.2.3.5. Machine de type cylindro-polaire

Cette configuration est la moins répandue. Elle est surtout utilisée pour les pièces de révolution principalement en aéronautique pour le contrôle d'éléments de moteurs d'avions ou de propulseurs.

Les machines à mesurer n axes sont des machines hybrides des cinq configurations précédentes. On peut citer les machines quatre axes composées d'une machine type portique équipée d'un plateau tournant, et les machines six axes composées de deux machines de type trusquin montées en vis à vis sur un même marbre (contrôle de carrosserie).



Fig.2.1. MMT de type col de cygne (ENSET Oran)

2.2.4. Composition de la machine à mesurer tridimensionnelle type col de cygne

2.2.4.1. D'un marbre en granit : est l'élément support de la sphère de référence et de montage positionnant la pièce à contrôler.

2.2.4.2. De trois glissières x, y, z : par rapport au marbre qui est fixe, les surfaces de liaisons prévues pour le montage du capteur se déplacent grâce à la mobilité des trois glissières réalisés par des patins aérostatiques; un film d'air d'une épaisseur de 5 microns sera nécessaire entre le bâti en granit et les patins afin d'assurer un guidage sans jeu ni frottement et d'une motorisation réalisée par des moteurs à courant continu. Le déplacement occasionné est mesuré sur les règles optiques par un système d'acquisition.

2.2.4.3. Logiciel de traitement : il récupère les coordonnées d'un point courant choisi arbitrairement sur le dernier mobile par rapport à une origine fixe machine. Elle est positionnée par des butées

physiques. A partir de ces coordonnées et d'autres indications fournies au logiciel, il calcule les coordonnées de points M_i palpés dans un référentiel attaché à la pièce.

2.2.4.4. Capteur : il est constitué par l'ensemble de tête de palpation (5 rubis comme configuration maximale). Les éléments importants sont le point de contact entre le rubis et la pièce, le centre du rubis et les surfaces de liaison avec la machine à mesurer tridimensionnelle.

2.2.4.5. Système de pré-traitement : c'est une carte d'acquisition et de comptage. Lors d'un déplacement, il y a création d'un signal en forme de créneau (impulsion) par les règles optiques incrémentables [AMA 03]. Le système de pré-traitement comptabilise les impulsions. Sous l'action d'un front descendant généré par le capteur, il arrête d'inventorier les impulsions sur les trois axes et envoie la sommation (coordonnées du point courant par rapport à OM dans le référentiel machine) au logiciel.

2.2.4.6. Opérateur : il est un élément de commande sur le logiciel. Par manipulation de ce logiciel, il doit effectuer la vérification d'une pièce mécanique.

2.3. Etat de l'art en métrologie tridimensionnelle

La métrologie tridimensionnelle industrielle dispose de divers capteurs et systèmes de contrôle de la production qui doivent être rapides, précis, fiables et faciles de mise en œuvre et automatiques. La figure.2.2 présente les capteurs généralement employés dans ce contexte sont de type mécanique, acoustique ou optique [GAV 99].

La première catégorie renvoie aux capteurs mécaniques, les plus couramment utilisés dans l'industrie. Le capteur et l'objet à tester sont en contact, par exemple, en étant montés sur une machine mobile multi-axes. Le déplacement par rapport à l'origine permet d'estimer la position tridimensionnelle des points de la surface de l'objet avec une précision de 0.01mm. Malheureusement, de par sa conception, cette technique induit des micro-déformations lors de l'acquisition. La classe des capteurs sans contact renvoie aux systèmes acoustiques et optiques. Dans ce contexte, les techniques de mesure optique sans contact sont généralement classées par les métrologues en actives et passives, et , absolues et relatives. Les systèmes acoustiques reposent sur la mesure du temps écoulé entre l'émission d'une onde et son écho sur l'objet à tester. La qualité de la mesure dépend fortement des paramètres physiques tels que le coefficient de réflexion sur la surface de l'échantillon, l'atténuation atmosphérique ou l'angle entre la normale à la surface et la direction de l'onde.

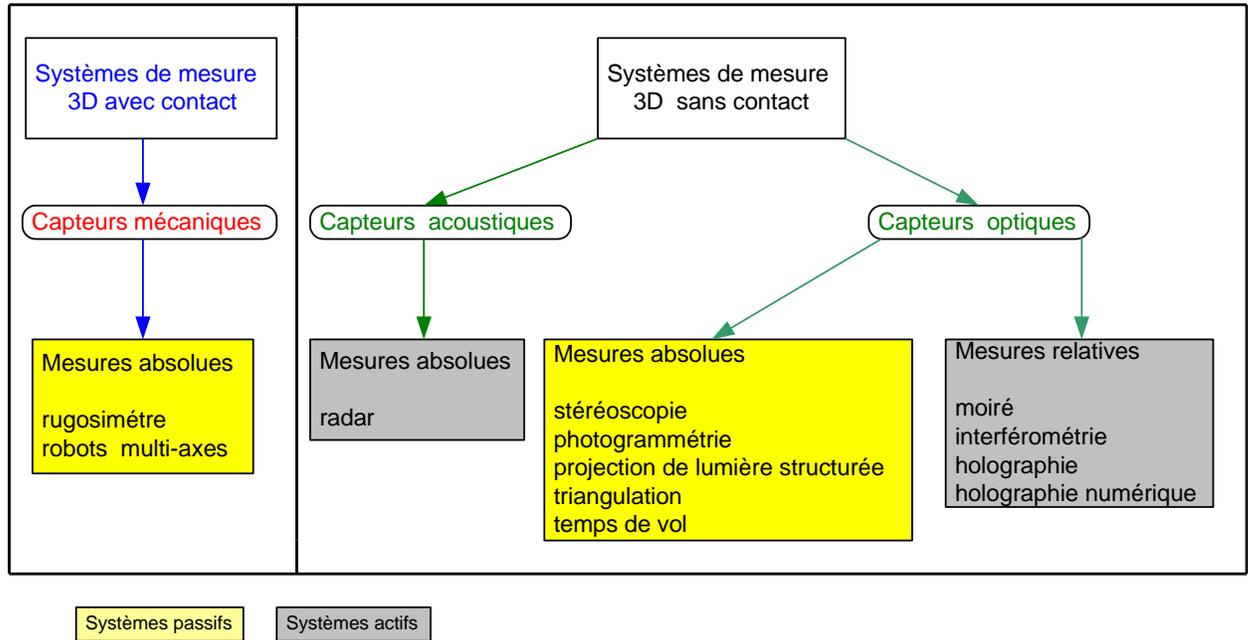


Fig.2.2. Gamme des techniques de mesure tridimensionnelle

Dans le cadre de ces développements, nous nous sommes intéressés aux seuls capteurs mécaniques (avec contact).

2.4. Capteurs à déclenchement

2.4.1. Introduction

Les machines à mesurer par coordonnées (MMT) se sont développées depuis la première introduction sur le marché. Ces machines simples à l'origine et ces systèmes manuels sont à présent devenus des centres d'inspection automatisés de grande précision.

On compte parmi les facteurs déterminants de cette évolution le capteur à déclenchement par contact et d'autres types de palpeur de mesure, ainsi que les innovations Renishaw qui suivirent, comme la tête motorisée et un système d'échange automatique pour des contrôles rapides et sans intervention manuelle. Tout a débuté avec les moteurs Rolls-Royce destinés au projet d'avion franco-anglais "Concorde" [REN 03]. Il fallait trouver une solution originale au problème que posait alors la mesure précise des tubulures. Ainsi naquit le premier capteur à déclenchement capable de réaliser avec précision et rapidité des mesures tridimensionnelles. Ce fut le point de départ de RENISHAW METROLOGY LIMITED qui a ensuite développé une gamme de capteurs et d'accessoires pour MMT sans équivalent.

2.4.2. Caractéristiques métrologiques du capteur

Le capteur [ASC 99], premier élément de la chaîne de mesure est la source déterminante du signal électrique que le reste de la chaîne doit traiter et exploiter. L'adaptation du capteur et de la chaîne de mesure implique que celle-ci n'ajoute pas au signal initial des incertitudes ou limitations supérieures à celles apportées par le capteur. C'est donc de la qualité du capteur que dépendent en premier lieu d'une part, la plus ou moins bonne concordance entre valeur mesurée et valeur vraie du mesurande, et d'autre part, les limites de l'incertitude sur la valeur mesurée.

2.4.3. Système de palpage dynamique

Le système de palpage se compose d'un stylet monté sur le capteur à déclenchement dynamique illustrée par la figure.2.3 lui-même connecté à la MMT utilisant une tête manuelle.

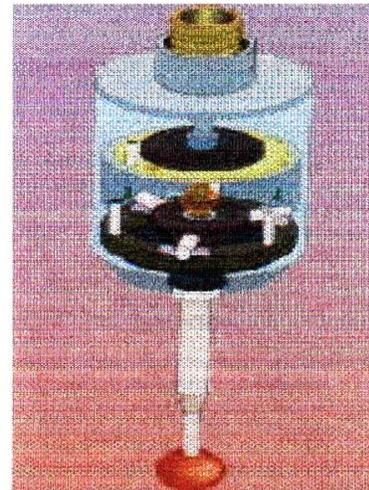


Fig.2.3. Capteur à déclenchement dynamique

2.4.4. Principe de fonctionnement

Le composant principal des capteurs à déclenchement par contact Renishaw est l'appui cinématique que montre la figure.2.4 . Il s'agit d'un mécanisme qui après déflexion du stylet repositionne celui-ci avec une très grande précision (répétabilité).

L'appui cinématique [REN 03] est constitué d'un tripode (1) pivotant sur trois points d'appui (2) par l'intermédiaire d'un ressort de compression hélicoïdal (3). Ces points d'appui sont composés de rouleaux et de billes.

Pour détecter les déplacements du stylet on contrôle un courant électrique circulant entre les billes et les rouleaux. Un circuit électronique génère un signal de déclenchement qu'exploite la commande numérique de la MMT.

Après déclenchement, le palpeur est dégagé de la pièce, la bille du stylet retrouve sa position initiale et un nouveau cycle de palpation est possible.

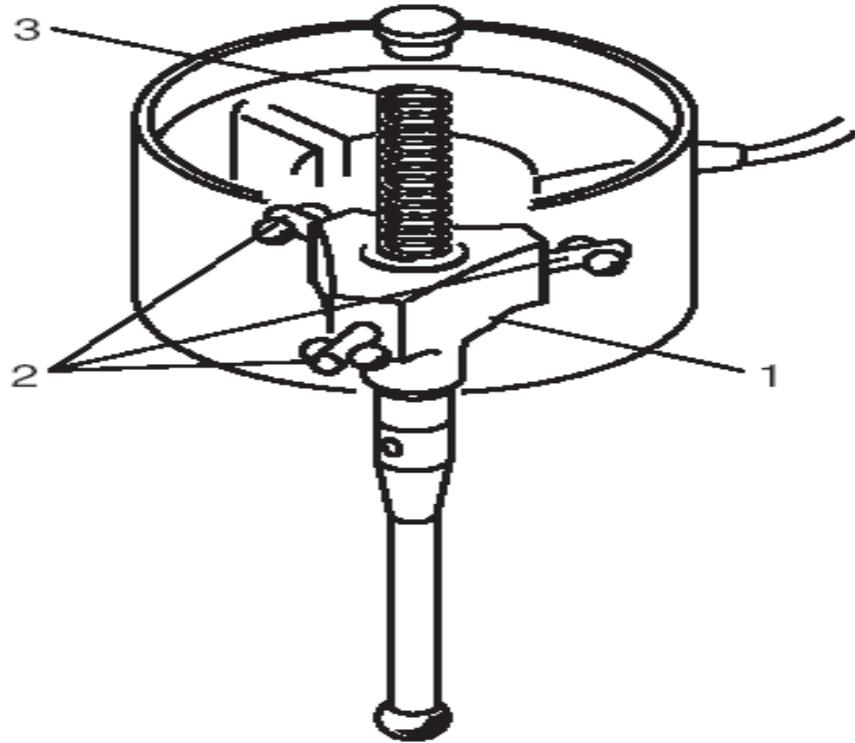


Fig. 2.4. Appui cinématique

2.4.5. Présentation des capteurs

Le TP1 (S) : capteur à fixation directe, ayant une grande sur course , tout particulièrement adapté aux machines à mesurer manuelles.

Le TP2 –5W : capteur compact pouvant s'introduire dans la pièce tout particulièrement adapté aux MMT motorisées CNC à commande numérique.

Le TP6 : complète la série TP2, mais avec des stylets plus longs et plus lourds : adaptés aux applications générales.

Le TP6A : ce capteur a les mêmes caractéristiques que le capteur TP6 avec en plus l'autojoint Renishaw (breveté) permettant de changer rapidement les palpeurs sans avoir besoin d'effectuer un nouvel étalonnage.

Le tableau.2.1 [REN 03] donne les forces de déclenchement de réglage de ces capteurs.

Tableau .2.1. Force de déclenchement

Capteurs MMT	Longueur de stylet(type)	Force de déclenchement optimale (préréglée par Renishaw)	Palpage de réglage de la force de déclenchement
TP1 (S)	31 mm (PS1 - 1 R)	15g	10 - 50 g
TP2 – 5W	10 mm (PS12R)	7 - 8 g	7 - 15 g
TP6 / TP6A	21 mm (PS1 - 12R)	11 - 13 g	11 - 30 g

2.4.6. Accessoires

2.4.6.1. Les stylets

Les stylets peuvent être utilisés avec tous les capteurs et sont fournis avec des tailles de billes en rubis industriel allant de 0,3 mm à 8 mm de diamètre. Ces billes sont disponibles avec des tiges en fibre de graphite (GF), en céramique, en carbure de tungstène et en acier couvrant toute une gamme d'applications. La gamme Renishaw se compose de cinq sortes de stylets :droits, étoiles, disques, cylindriques ou en pointes.

2.4.6.2. Sélection des stylets

Pour obtenir une précision optimale au cours de la plupart des opérations de palpation, Renishaw donne les recommandations suivantes :

- Utiliser des stylets petits et rigides

Plus les stylets se courbent ou fléchissent, moins la précision est grande. Renishaw recommande d'effectuer des palpations avec un stylet de longueur minimum et constitué d'une seule pièce si possible.

Il faut donc éviter d'effectuer des opérations de palpation avec des stylets trop grands et composés de plusieurs éléments.

- Utiliser la bille de stylet du plus grand diamètre possible

Ceci permet d'obtenir un dégagement maximal entre la bille et la tige tout en fournissant une longueur de travail effective (LTE) plus grande. L'utilisation des billes en rubis de gros diamètre minimise les défauts d'état de surface de la pièce en cours d'inspection.

La longueur de travail effective (LTE) correspond à la grandeur de pénétration de la bille en rubis avant que sa tige entre en collision avec la pièce. En général, plus le diamètre de la bille est grand, plus la LTE est importante figure.2.5.

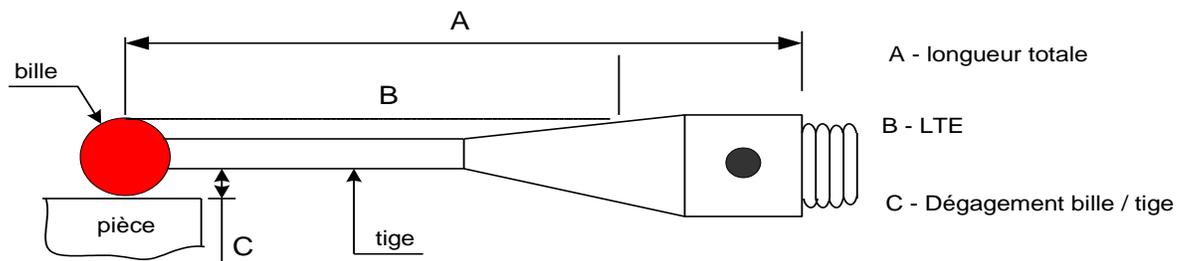


Fig.2.5. Longueur de travail effective

2.5. La MMT et son environnement

Il est difficile de parler de mesures sans parler des conditions d'environnement dans lesquelles celles-ci sont effectuées. Les tolérances de précision données par les constructeurs de MMTs, le sont toujours pour une température définie et constante. Même si de plus en plus de fabricants proposent des systèmes sophistiqués de compensation de variations de température (plus spécifiquement pour les MMTs directement implantés dans les ateliers), il est préférable de s'assurer que le local, dans lequel est implanté la machine, répond aux critères suivants: absence de source de chaleur, mur ou accès direct sur l'extérieur, absence de vibrations. Afin d'éviter l'apparition d'erreurs dues à la dilatation de la pièce à contrôler et plus encore de la machine, il est donc, en général, conseillé de climatiser le local de mesure.

Cette climatisation devra répondre à certains critères comme sa capacité à maintenir une température constante (à $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$) et homogène dans toute la salle, avoir un système de diffusion évitant cette sensation de courant d'air très désagréable pour le personnel. Dans tous les cas, il faudra éviter que la machine soit soumise à toute source de rayonnement extérieur (soleil) ou intérieur (luminaires).

Tout d'abord, pour qu'une machine puisse être installée dans une ambiance d'atelier, même protégée par une cabine, il faut qu'elle soit thermiquement la plus stable possible.

Si le local de contrôle se trouve à proximité d'un atelier de presses ou de forges ou bien encore, d'une voie de chemin de fer, il faudra prévoir un isolement par vérins à air afin d'éviter que ces vibrations viennent perturber les mesures; de plus, la machine devra reposer sur un sol stable et homogène pour ne pas faire subir de déformations à la machine (surtout utile pour les machines de très grandes dimensions type à bras ou à pont reposant sur de sol par de nombreux points d'appuis). Il est alors conseillé de faire réaliser une dalle sur laquelle reposera la machine.

2.6. Convivialité

Une autre nécessité imposée par l'utilisation en atelier réside dans la facilité d'accès pour tous à la commande de la machine. Pour cela, les machines peuvent être pilotées à l'aide du logiciel, autorisant un personnel non spécialisé à leur utilisation. De plus, le calculateur peut être enfermé dans une baie étanche et commandé par un stylo lumineux ou une simple souris. Une autre formule consiste à intégrer la machine à mesurer tridimensionnelle comme cellule de mesure fonctionnant en automatique et reliée directement à une ou plusieurs machines de production. Dans le cas de production en série, le logiciel statistique SPC permet de travailler par prélèvement. Celui-ci fournit directement les différentes courbes d'analyse de données. Cette utilisation en automatique ou par un personnel non formé ne veut pas dire que l'intelligence informatique de ces machines soit limitée. Au contraire, le logiciel regroupe un ensemble de modules qui va de la création de pièce en CAO pour une programmation complète, l'analyse de surface par comparaison avec le modèle CAO, le positionnement virtuel de la pièce dans l'espace pour une mise en place rapide et sans précaution particulière, la digitalisation de forme gauche avec ou sans contact jusqu'à l'édition de rapports de contrôle complets. Cet exemple de machine montre qu'il est possible d'intégrer une MMT en atelier. Afin de garantir la bonne réponse des pièces à leur cahier des charges géométriques, cela devient nécessaire. De plus, la présence d'une MMT en atelier autorise une réaction plus rapide, une mise en route plus souple de la production et limite l'immobilisation des machines-outils.

2.7. Critères d'association de surfaces aux points palpés

2.7.1. Introduction

La mesure tridimensionnelle a pris une place importante dans le système de production. En effet la rentabilité économique de l'automatisation des moyens de production nécessite un contrôle rigoureux et automatique des spécifications géométriques des pièces produites. Les ateliers intègrent des machines produisant vingt-quatre heures sur vingt-quatre avec des temps de changement de pièces, d'outils et de production de plus en plus courts. De telles performances ne sont possibles que par des pré réglages des portes- pièces et des outils c'est à dire par une mesure des surfaces réalisées afin d'adapter les trajectoires réelles des outils aux formes et spécifications des pièces désirées.

Le problème général ainsi posé est celui de l'identification des surfaces réelles d'une pièce fabriquée. Cette identification a pour objectif d'optimiser, les écarts géométriques entre une forme théorique désirée et la forme réellement exécutée.

L'objectif est l'exploration des systèmes d'association de surfaces existant aux points mesurés sur machine à mesurer tridimensionnelle pour la détermination de la « la meilleure » identification d'une géométrie, et par suite d'obtenir « la meilleure » qualité des paramètres nécessaires en mesure tridimensionnelle.

2.7.2. Point de vue de la métrologie tridimensionnelle

Actuellement le développement de la démarche qualité dans les entreprises se traduit par la recherche de la maîtrise du processus de production du contrôle. Aussi les instruments de mesure se développent avec l'application du contrôle statistique intégré au processus de production. Cette extension est basée sur l'emploi de l'informatique, de fait les Machines à Mesurer Tridimensionnelle (MMT) se sont imposées dans l'industrie.

Avec une MMT, le métrologue doit caractériser les surfaces réelles afin de régler la fabrication et valider la production. Il est amené à associer à chaque ensemble de points palpés (P_i) illustrés par la figure.2.6 représentant la surface réelle, un modèle géométrique de définition représentant la forme de la surface idéale associée. Ces points sont définis par leurs coordonnées cartésiennes dans le repère lié à la machine constituent les données numériques de l'opération de contrôle. Selon les normes chaque dimension locale d'une pièce doit rester à l'intérieur de sa tolérance dimensionnelle. Par dimension locale, elles stipulent qu'il s'agit de la distance entre deux points d'une entité dimensionnelle dans toute

section normale. Mais dans la réalité, les machines à mesurer tridimensionnelles permettent de mesurer que des points sur des surfaces. Elles ne mesurent pas des distances directement comme un micromètre pour mesures extérieures ou un pied à coulisse. Aussi, pour valider l'opération de contrôle, le métrologue se trouve dans l'obligation de réaliser une association, selon un critère, des éléments géométriques idéaux (plan, surfaces, etc..) sur les points mesurés pour pouvoir calculer ensuite la distance entre les dites surfaces. Parallèlement, il n'y a aucune norme qui dicte de façon précise les critères d'association des points relevés, sur des machines à mesurer, aux surfaces nominales.

Rappelons que l'association consiste en l'application d'un algorithme approprié à partir de la forme de la géométrie idéale sur le nuage de points relevés. La surface associée est géométriquement parfaite, mais elle ne représente pas parfaitement la surface réelle. Elle est soumise à des incertitudes (les vibrations, la connaissance précise du rayon du palpeur, la position de la pièce, etc...). Néanmoins, différentes approches se développent afin de mieux appréhender le calcul des incertitudes de mesures sur les MMT [SEL 99].

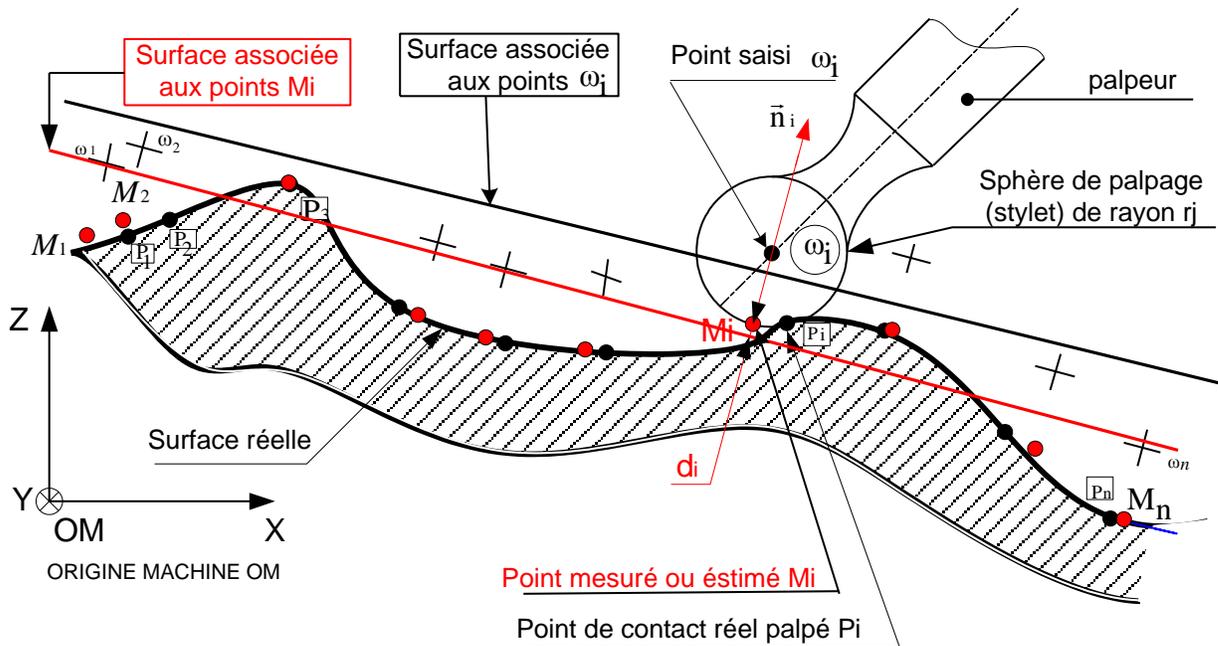


Fig.2.6. Surfaces associées aux points en métrologie tridimensionnelle

2.7.3. Calcul des points mesurés

Le point de contact réel entre le palpeur (stylet) et la surface mesurée étant inconnu, on lui substitue par calcul un point *estimé* appelé *point mesuré* M_i . Ce dernier est calculé à partir des coordonnées du point saisi ω_i (centre du stylet), du sens d'accostage et du rayon apparent r_j du stylet j illustré par la figure.2.6 précédente.

Dans le cas de palpeurs à déclenchement, on fait l'hypothèse que le point de contact estimé M_i est à l'intersection de la sphère de palpation et de la normale \vec{n}_i à la surface passant par le point saisi ω_i .

2.7.4. Expression des écarts entre le réel et le modèle géométrique nominal

Le réel peut être identifié par des écarts entre un représentant du réel (nombre fini de points ou éléments de substitution) et la géométrie nominale correspondante (ou élément géométrique idéal initial) illustrés par la figure 2.7.

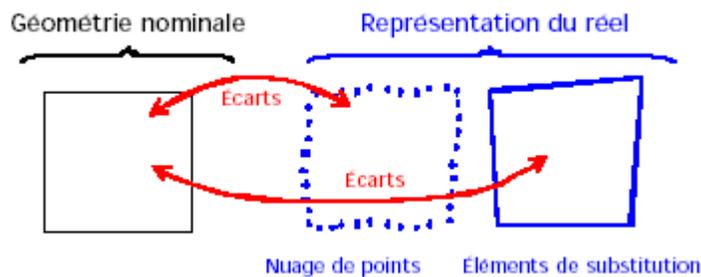


Fig.2.7. Écarts entre réel et nominal

- Cas d'un nombre fini de points

Dans le cas d'un nombre fini de points les écarts ζ_i entre les points de la surface réelle et la géométrie nominale sont exprimés suivant les normales \vec{n}_i au modèle nominal :

Pour une position du modèle nominal les écarts peuvent être limités par un critère. Par exemple chaque écart ζ_i donné par la figure.2.8 doit respecter la condition $\zeta_{i \text{ Mini}} \leq \zeta_i \leq \zeta_{i \text{ Maxi}}$.

Un ensemble fini de points peut définir un élément de substitution sous contrainte et suivant un critère d'association ou d'optimisation à l'ensemble des points palpés.

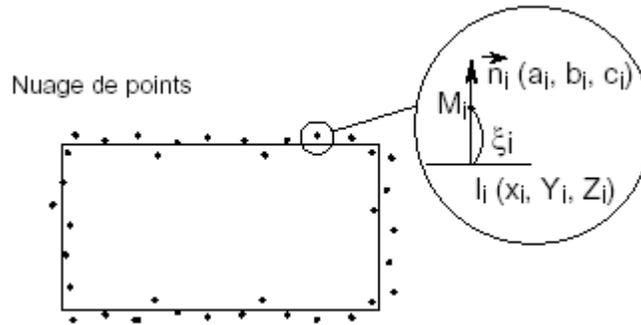


Fig.2.8. Nuage de points

2.7.5. Eléments géométriques associés aux éléments palpés

2.7.5.1. Outils d'association d'éléments géométriques à un nuage de points

L'association d'un élément géométrique idéal à un nuage de points revient à résoudre un problème mathématique d'optimisation sous contraintes. En effet, une bonne connaissance des surfaces et des lignes réelles, impose qu'elles soient mesurées par un nombre de points, supérieur au nombre de points minimal, nécessaire et suffisant à la définition mathématique de l'élément géométrique idéal correspondant.

Les surfaces ou les lignes réelles n'étant jamais parfaites, les points palpés ne peuvent pas tous appartenir à l'élément géométrique idéal recherché. L'association d'un élément géométrique idéal à un nuage de points devra donc répondre au critère de la « meilleure représentation » de l'élément géométrique réel [BOU 98].

Le tableau.2.2. donne pour chaque ligne et chaque surface, le nombre minimal de points nécessaires à la définition mathématique de l'élément géométrique, ainsi que le nombre de points classiquement préconisé par les logiciels de la machine à mesurer [BOU 99b]. Le nombre maximal de points n'a théoriquement pas de limite, néanmoins, pour limiter les temps de calcul et gérer les capacités de calcul des logiciels, il est souvent limité à une cinquantaine de points de mesure par élément.

Tableau.2.2. Nombre de points palpés

Nom de l'élément géométrique	Nombre de points palpés minimal	Nombre de points palpés préconisés par les logiciels
Droite associée	2	3
Cercle associé	3	4
Plan associé	3	4
Sphère associée	4	9
Cylindre associé	5	8
Cône associé	6	8

Les normes de spécification donnent des indications sur la « meilleure représentation » d'une surface réelle par une surface idéale. On peut distinguer deux critères, l'un est relatif à la forme de l'élément, l'autre à sa fonction d'assemblage. Le tableau.2.3. résume les différentes possibilités proposées par la norme ISO 5459 pour un élément géométrique seul.

C'est ainsi que la forme d'un élément est caractérisé par un défaut de forme Df_n (ou t).

L'élément géométrique réel doit être compris entre les deux enveloppes, formées par l'ensemble des sphères ou des cercles de diamètre t , centrés sur l'élément géométrique idéal. Le défaut de forme t est : soit minimal lors d'une mesure ou soit imposé lors d'un contrôle. La fonction d'assemblage se traduit par un élément géométrique idéal tangent du côté libre de la matière, avec, soit une condition de défaut de forme minimal pour les plans et les cônes, soit une condition du plus grand élément inscrit ou du plus petit élément circonscrit pour les cercles, sphères et cylindres.

Tableau 2.3. Critères d'association déduits de la norme ISO 5459

<i>Type d'élément géométrique</i>	Défaut de forme (Df_n ou t) avec t minimal	<i>Assemblage d'un élément géométrique idéal</i>
Plan	2 plans parallèles distants de t	Plan tangent extérieur matière écart maxi t au plan réel, minimal
Sphère	2 sphères concentriques distants de t	Plus grande sphère tangente intérieure matière Plus petite sphère tangente extérieure matière
Cylindre	2 cylindres coaxiaux distants de t	Plus grand cylindre tangent intérieur matière Plus petit cylindre tangent extérieur matière
Cône	2 cônes coaxiaux distants de t	Cône tangent intérieur matière écart maxi plan réel, minimal
Cercle	2 cercles concentriques distants de t	Plus grand cercle tangent intérieur matière Plus petit cercle tangent extérieur matière
Droite	2 droites parallèles distantes de t	Droite tangente extérieure matière écart maxi t à la droite réelle, minimal

2.7.5.2. Principaux critères d'association de surfaces

L'association d'un élément géométrique parfait à un ensemble de points est l'un des problèmes fondamentaux de la mesure tridimensionnelle. Cette association est nécessaire à chaque étape du processus d'interprétation des points palpés [BOU 99a]. En effet elle permet tout d'abord, avec un critère d'association des moindres carrés, de définir les normales aux points de contact entre le palpeur et la surface et de calculer les ensembles de points mesurés, puis de donner suivant différents critères

une représentation simplifiée de la géométrie réelle de la pièce, elle permet également d'effectuer des contrôles par calibre numérique, d'associer une référence ou un système de références à plusieurs éléments mesurés et de calculer un défaut de forme dans le cas où la machine à mesurer permet de mesurer une surface avec un très grand nombre de points.

L'identification d'un élément géométrique parfait, représentatif d'un ensemble de points, doit permettre de définir la nature de l'élément géométrique, son orientation, sa position et ses dimensions intrinsèques. En mesure tridimensionnelle la nature de l'élément géométrique est toujours imposée, par contre les autres caractéristiques sont obtenues par optimisation, certaines contraintes géométriques partielles peuvent être imposées, les critères d'optimisation peuvent être multiples.

On peut citer cinq critères d'optimisation principaux :

- *Le critère de Gauss ou des moindres carrés* où la somme des carrés des plus courtes distances entre les points mesurés et l'élément géométrique associé doit être minimale.

- *Le critère de Chebyshev ou du minimax* où la plus grande des plus courtes distances entre les points mesurés et l'élément géométrique associé, doit être minimale.

- *Le critère de tangence* où l'élément géométrique associé doit être situé d'un même côté de l'ensemble des points mesurés, et être en contact avec au moins un point mesuré. Le côté choisi est en général celui du côté libre de la matière.

- *Le critère de minimum circonscrit* où l'élément géométrique associé (cercle, sphère, cylindre et tore) doit avoir son rayon le plus petit possible, et être situé à l'extérieur de l'ensemble des points mesurés.

- *Le critère de maximum inscrit* où l'élément géométrique associé (cercle, sphère, cylindre et tore) doit avoir son rayon le plus grand possible, et être situé à l'intérieur de l'ensemble des points mesurés.

Remarques:

Les cinq critères décrits ci-dessus ne sont pas limitatifs, de nombreux autres critères mieux adaptés aux applications peuvent être définis, principalement dans le calcul de la distance minimale (ou maximale) entre deux plans parallèles, dans l'association de plusieurs cylindres coaxiaux, dans l'association de systèmes de référence ou encore dans le contrôle de localisation. L'utilisation de tous ces critères en métrologie tridimensionnelle est souvent contestée par la non unicité mathématique des résultats, par l'absence de la normalisation et par la non validité des résultats lorsqu'ils sont obtenus sur des surfaces mesurées en très peu de points.

Le tableau.2.4 résume les possibilités offertes par les cinq principaux critères.

On remarque que le critère des moindres carrés offre toutes les possibilités pour l'association de surfaces.

Tableau.2.4. Possibilité offertes par les cinq principaux critères

Critères	Paramètres géométriques			Applicables à des éléments D'étendue limitée	Unicité dans les résultats
	orientation	position	intrinsèques		
Moindres carrés	oui	oui	oui	oui	oui
Chebychev	oui	non	non	oui	non
Tangence	oui	oui	oui	oui	non
Minimum circonscrit	oui	oui	oui	non	non
Maximum inscrit	oui	oui	oui	non	non

2.8. Exploration des moyens d'association d'une surface géométrique idéale à un nuage de points

La figure.2.9 illustre le cas général, d'une mesure effectuée sur machine à mesurer tridimensionnelle pour l'identification d'une surface [BOU 87] est connue par l'ensemble des coordonnées des centres ω_j de la sphère de palpation lorsque celle-ci est venue en contact avec la surface à mesurer, ces coordonnées sont exprimées dans le repère de la machine à mesurer (OM).

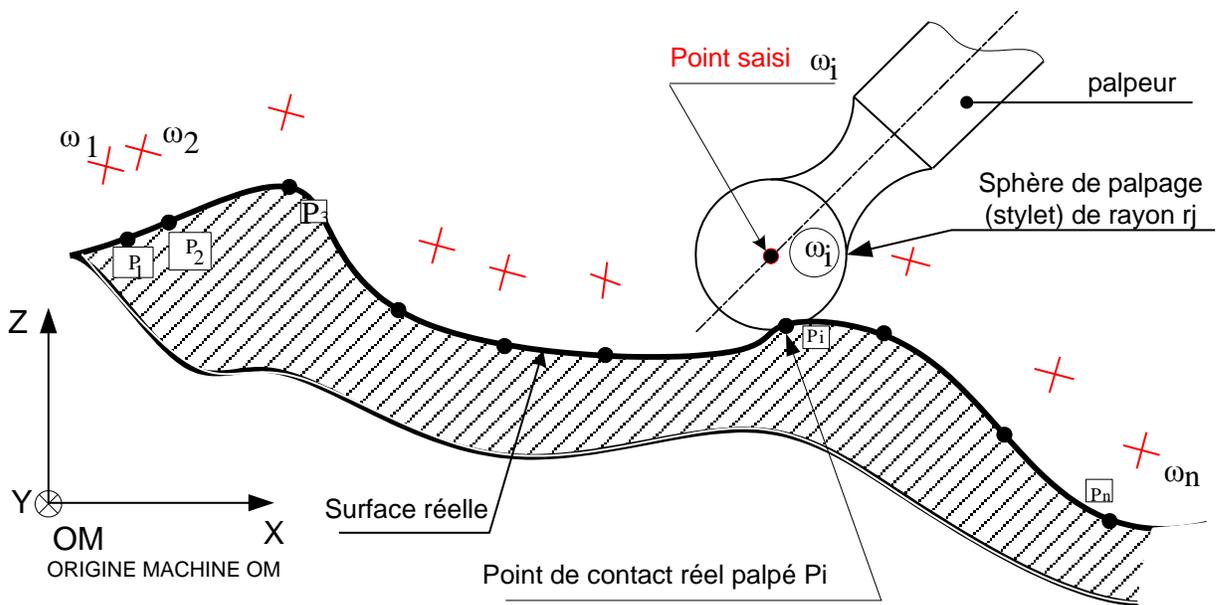


Fig.2.9. Palpage du nuage de points

On suit alors les étapes suivantes

2.8.1. Première étape :

Définition de la *surface géométrique idéale nominale* : elle passe par des points ω_i privilégiés (points éloignés au maximum exemple ω_i et ω_{n-1}) illustrée par la figure.2.10, elle peut être également définie par une approche statistique. Dans tous les cas on lui attache, une origine et une direction \vec{n} privilégiée, qui permettront de définir un changement d'axes amenant chaque cas de surface étudiée sous une forme canonique centrée sur le système d'axes de mesure de la machine à mesurer.

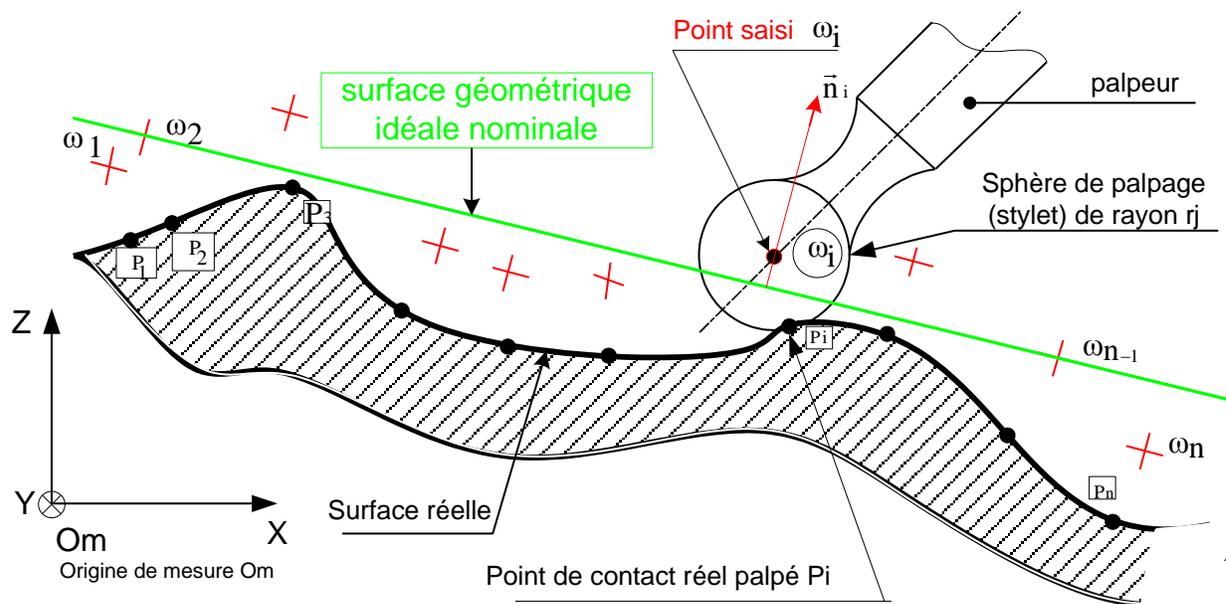


Fig.2.10. Surface géométrique idéale nominale

2.8.2. Deuxième étape :

Par chargement d'axes la surface géométrique idéale nominale et les points ω_i de mesure sont centrés sur le système d'axe $ox\ oy\ oz$ de la machine à mesurer, on obtient ainsi l'ensemble des points M_i mesurés ou estimés illustrés par la figure.2.11.

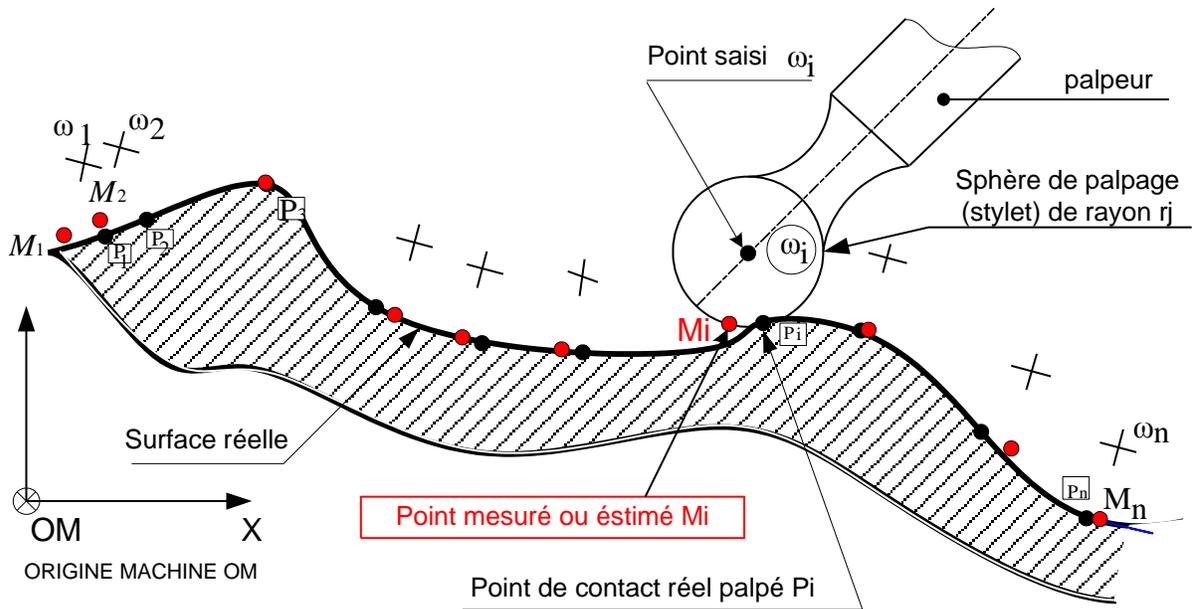


Fig.2.11. Ensemble des points mesurés M_i

2.8.3. Troisième étape :

Pour tout point M_i on calcule le point théorique M_{th_i} correspondant à la surface géométrique idéale nominale ainsi que la normale \vec{n}_i et l'écart de mesure ξ_i illustrés par la figure.2.12 avec le torseur de petits déplacements (Small Displacement Torsor : SDT)

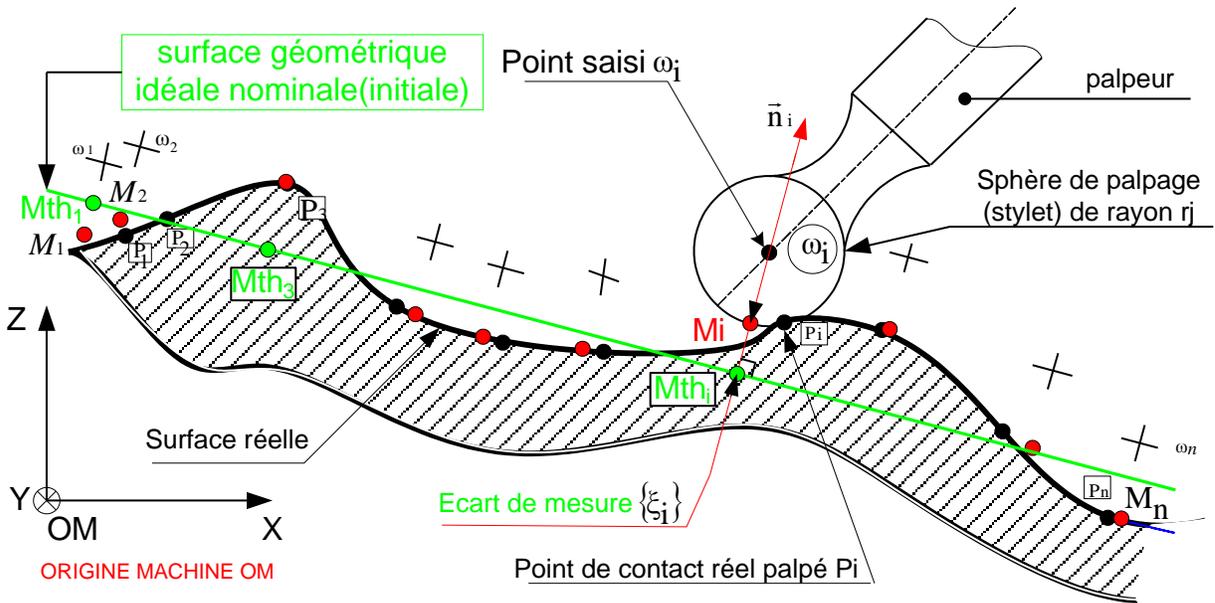


Fig.2.12. Ensemble des points calculés M_{th_i}

2.8.4. Quatrième étape :

On cherche à optimiser la surface géométrique idéale nominale par rapport aux points mesurés en lui faisant subir un petit déplacement répondant à un critère d'optimisation.

2.8.5. Cinquième étape :

On définit la *surface géométrique idéale associée* en faisant subir aux points de définition de la surface idéale nominale le petit déplacement trouvé à l'étape précédente.

Par rotation et translation inverse de celles effectuées à la deuxième étape on connaît alors la surface géométrique idéale associée aux points ω_i centres de la sphère de palpation. Il ne reste plus qu'à tenir compte du sens d'accostage de la machine et du rayon de la sphère de palpation pour obtenir la surface géométrique idéale associée aux points mesurés M_i de la surface illustrée par la figure.2.13.

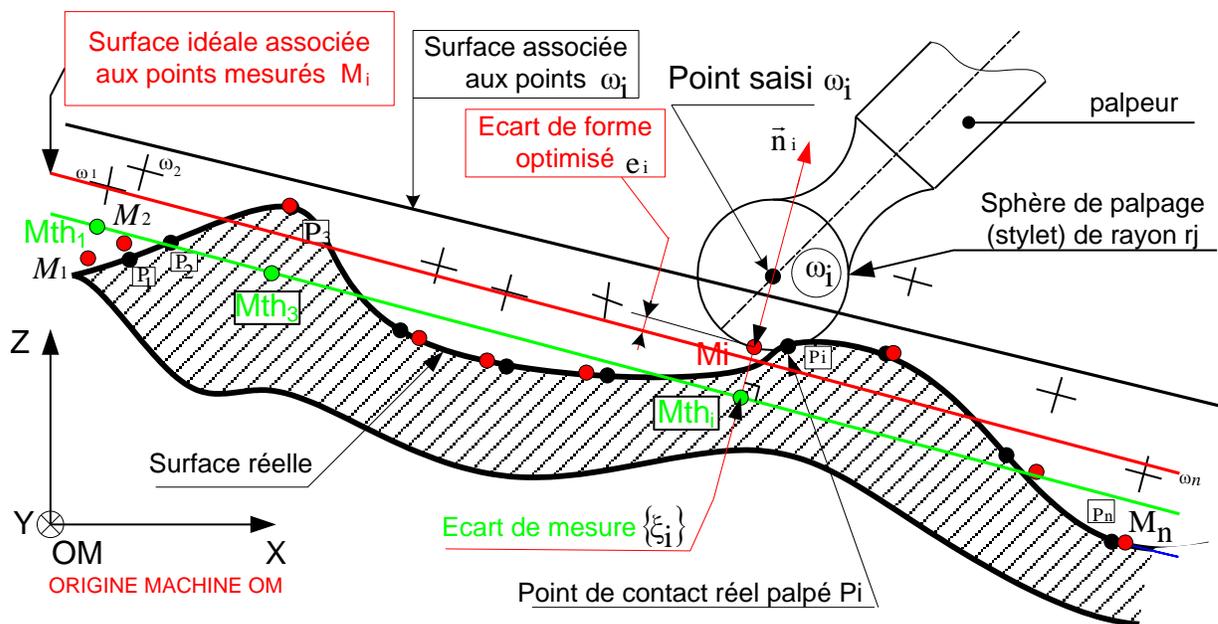


Fig.2.13. Surface idéale associée aux points mesurés M_i

2.9. Principe du contrôle virtuel

De façon traditionnelle les surfaces de la pièce sont palpées individuellement. Le logiciel les identifie en calculant une surface théorique s'ajustant au mieux sur les points palpés. Cependant, chaque surface est représentée par ses points palpés. La surface théorique ajustée ne sert qu'au contrôle individuel des surfaces palpées (dimension et défaut de forme) et constitue une étape nécessaire aux calculs effectués

par la suite. L'utilisateur définit ensuite, grâce aux boîtes de dialogue du logiciel, des calibres virtuels composés de plusieurs surfaces de formes simples, plan, cylindre, cône, sphère, appelées *calibres élémentaires* dessinés par la figure.2.14 [PAI 95]. Par exemple, de façon imagée, un cylindre ajustant cherche à «gonfler» au maximum à l'intérieur d'un alésage. Le logiciel calcule alors s'il est possible d'assembler et d'*ajuster* le calibre virtuel avec les surfaces palpées de la pièce. En associant plusieurs calibres élémentaires entre eux, on construit des calibres virtuels plus complexes, appelés calibres composés.

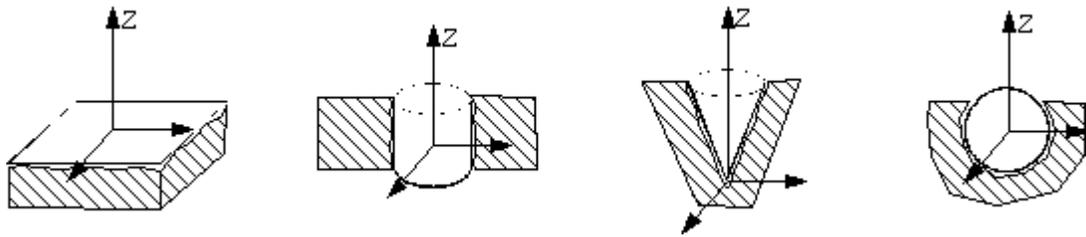


Fig.2.14. Base de calibres virtuels élémentaires

2.10. Conclusion

La machine à mesurer tridimensionnelle ou par coordonnées appelée (MMT) est basée sur un principe simple. A l'aide de règles de mesure de haute précision placées sur les différents guidages d'une machine, on relève les coordonnées du centre du palpeur qu'on vient de mettre en contact avec la surface réelle de la pièce à palper.

- L'association est nécessaire à chaque étape du processus d'interprétation des points palpés.
- L'identification d'un élément géométrique idéal représentatif d'un nuage de points permet de définir la nature de l'élément géométrique réel.
- Le critère d'association des moindres carrés est le plus utilisé dans les logiciels des machines à mesurer tridimensionnelle.
- Les écarts de mesure ξ_i sont compris entre la surface géométrique idéale nominale (ou initiale) et les points palpés de la surface.
- Les normes de spécification donnent des indications sur la « meilleure représentation » d'une surface réelle par une surface idéale. L'élément géométrique réel doit être compris entre deux enveloppes. La forme d'un élément est caractérisée par un défaut de forme nominal Df_n .

On expose au chapitre suivant, une étude expérimentale sur le contrôle de quelques spécifications géométriques de forme avec calculs de leurs défauts de forme en aboutissant à la nécessité de l'association d'éléments géométriques.

CHAPITRE 3

Applications du contrôle des spécifications géométriques de forme

3.1. Problématique

Lors de la conception d'une pièce, le bureau des études définit des surfaces géométriques. En réalité aucun moyen de production ne permet d'obtenir des côtes exécutées ou des surfaces géométriques parfaites. Il est donc nécessaire d'introduire des limites de réalisation, précisées sur les surfaces spécifiées (de références ou tolérancées).

La métrologie a pour but de mesurer, vérifier ou comparer la surface réelle pour s'assurer que ces limites ont été respectées.

Nous proposons les applications de contrôle de la rectitude, planéité et de la circularité sur les pièces manufacturées avec les deux méthodes suivantes :

- sur marbre à l'aide du comparateur à cadran et des instruments associés
- à l'aide de la machine à mesurer tridimensionnelle du laboratoire de métrologie dimensionnelle du département de mécanique ENSET Oran.

3.2. Applications du contrôle de la rectitude

3.2.1. Contrôle sur marbre à l'aide du comparateur de la première pièce "semelle"

L'usinage de la surface de la pièce a été fait en ébauche sur une fraiseuse verticale universelle puis sa finition sur une rectifieuse plane.

Sur la surface (S) de la pièce nommée "semelle", à l'aide d'une règle graduée et avec un stylo feutre, on trace une ligne droite sur laquelle on désigne vingt deux points distants de 5mm ensuite on les entoure chacun d'un petit cercle comme l'illustre la figure.3.1.

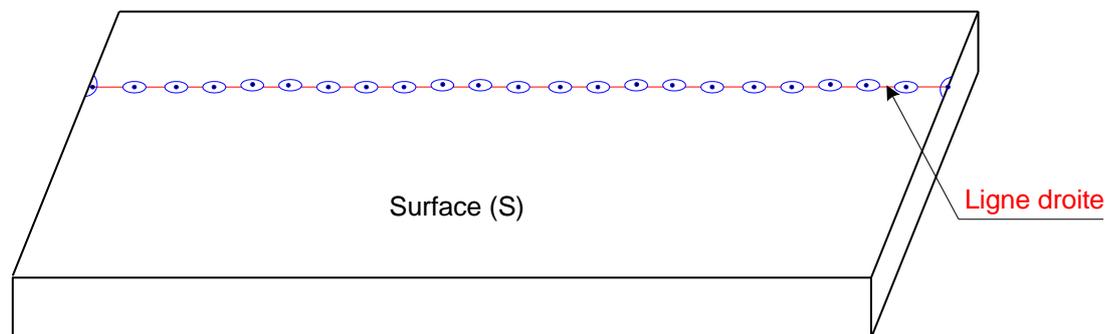


Fig.3.1. Désignation des points sur la surface (S) de la semelle

On dispose d'un marbre sur lequel on pose le socle d'un comparateur à cadran (précision de 0.01mm) et de trois vérins réglables en les plaçant en forme de triangle illustrés par la figure.3.2a.

Ensuite, on pose la semelle sur les trois vérins. On met le palpeur du comparateur perpendiculaire à la surface (S). On règle facilement les vérins avec leurs têtes à vis moletées pour que le comparateur marque "zéro" respectivement en trois points(A, B et C) de la surface (S) éloignés au maximum. Les points (A et B) représentent respectivement le premier et le dernier point de la ligne à contrôler. La droite AB est maintenant parallèle à la surface de référence du marbre ; elle définit ainsi la droite géométrique idéale nominale (ou initiale) de mesure.

Enfin, on palpe tous les autres points de la ligne à contrôler par le palpeur du comparateur en faisant glisser son socle sur le marbre tout en relevant leurs écarts de mesure ξ_j .

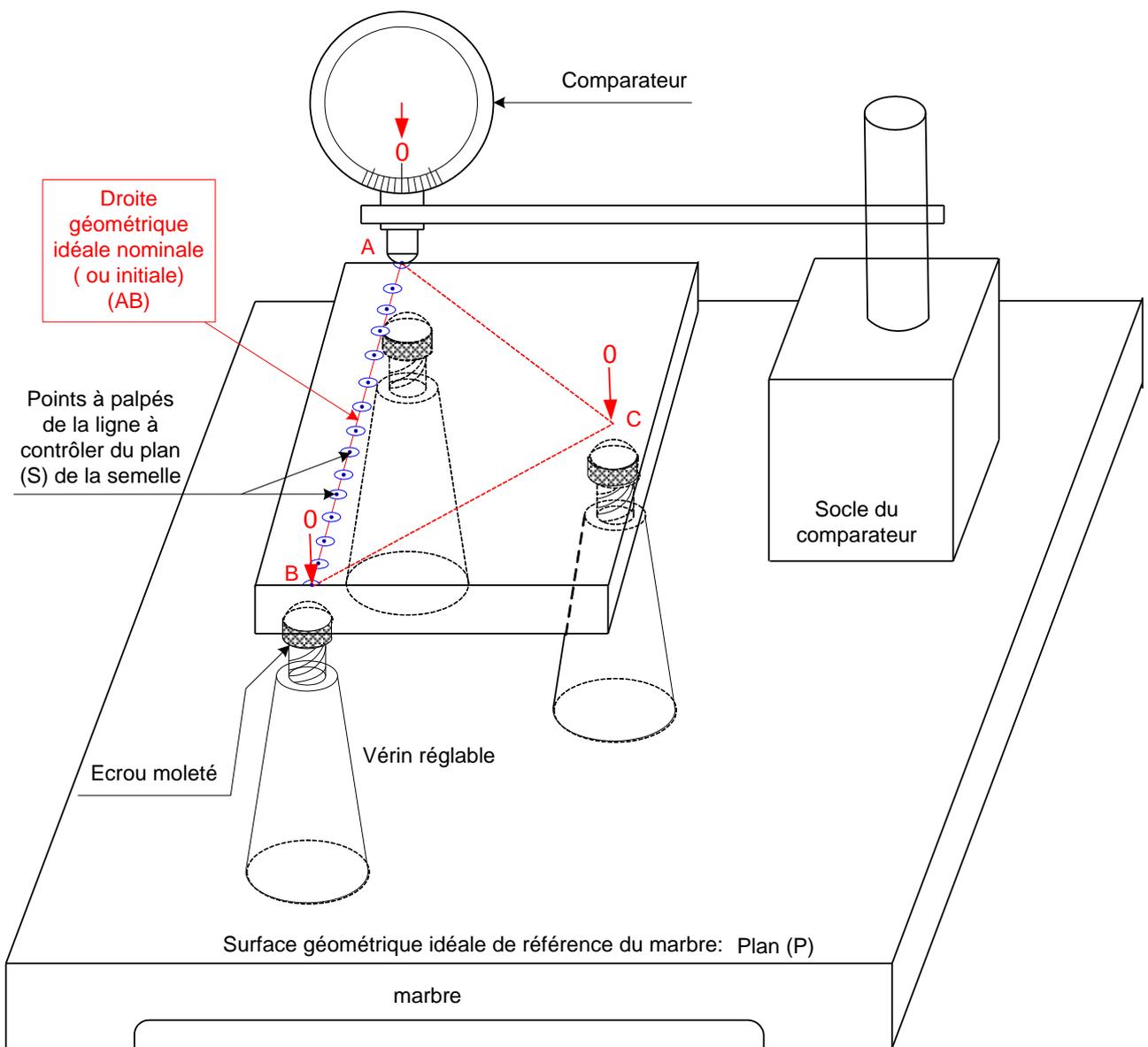


Fig.3.2a. Contrôle de la rectitude sur marbre de la semelle

On enlève la pièce de son emplacement puis on la balance à nouveau manuellement comme est illustrée par la figure.3.2b sur les vérins et on recommence les opérations de contrôle citées avant pour palper les mêmes points de la ligne réelle.

Fig3.2b. Contrôle de la rectitude sur marbre de la semelle



Les écarts de mesure ξ_i pour les cinq "balancements" de la pièce avec leurs abscisses en x_i sur le plan (S) sont donnés au tableau 3.1.

Tableau.3.1. Ecart de mesure de la rectitude de la semelle

N°	Ecart de mesure $\xi_i = z_i$ (en mm)					x_i (mm)
	1 ^{er} balancement	2 ^{ème} balancement	3 ^{ème} balancement	4 ^{ème} balancement	5 ^{ème} balancement	
1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
2	+0.010	+0.010	+0.020	-0.005	+0.025	5
3	+0.018	+0.015	+0.015	+0.002	+0.020	10
4	+0.032	+0.038	+0.032	+0.011	+0.030	15
5	+0.038	+0.030	+0.035	+0.020	+0.035	20
6	+0.032	+0.034	+0.045	+0.030	+0.040	25
7	+0.032	+0.040	+0.040	+0.038	+0.044	30
8	+0.035	+0.035	+0.050	+0.029	+0.045	35
9	+0.038	+0.032	+0.048	+0.032	+0.048	40
10	+0.048	+0.038	+0.048	+0.038	+0.049	45
11	+0.048	+0.032	+0.048	+0.030	+0.048	50
12	+0.040	+0.040	+0.050	+0.038	+0.050	55
13	+0.042	+0.050	+0.049	+0.040	+0.044	60
14	+0.045	+0.035	+0.050	+0.048	+0.050	65
15	+0.035	+0.034	+0.046	+0.042	+0.050	70
16	+0.040	+0.035	+0.040	+0.050	+0.045	75
17	+0.030	+0.032	+0.038	+0.050	+0.040	80
18	+0.034	+0.030	+0.030	+0.042	+0.040	85
19	+0.030	+0.028	+0.038	+0.038	+0.030	90
20	+0.030	+0.020	+0.028	+0.003	+0.034	95
21	+0.024	+0.012	+0.025	+0.028	+0.025	100
22	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	105

3.2.1.1. Calcul des défauts de forme nominaux

Les défauts de forme nominaux sont calculés à partir des valeurs maximales et minimales du tableau 3.1 de chaque balancement de la semelle et sont donnés au tableau 3.2.

Tableau.3.2. Défauts de forme nominaux de la rectitude de la semelle

Défauts de forme nominaux $Df_n = \sup\{\xi_i\} - \inf\{\xi_i\}$ en mm				
1 ^{er} balancement	2 ^{ème} balancement	3 ^{ème} balancement	4 ^{ème} balancement	5 ^{ème} balancement
0.048	0.050	0.050	0.055	0.050

3.2.1.2. Constatation

On constate d'après le tableau.3.1 que les écarts de mesure ξ_i de chaque point palpé ne sont pas toujours égaux à la même valeur des cinq balancements de la pièce. La valeur du défaut de forme nominal d'après le tableau.3.2 n'est pas la même. On peut avoir d'autres écarts de mesure ξ_i et défauts de forme différents pour d'autres balancements de la pièce et pour d'autres points palpés.

On conclut qu'il n'y a pas de répétitivité dans la plupart des résultats de la rectitude de la semelle. Les écarts de mesure quantifient les fluctuations des valeurs observées autour de la valeur centrale ; dans ce cas une moyenne arithmétique des écarts de mesure s'avère très nécessaire.

3.2.1.3. Calcul des moyennes arithmétiques des écarts de mesure ξ_i

La moyenne de l'écart de mesure de chaque point palpé est donnée par la formule suivante :

$$\bar{\xi}_i = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \xi_i}{n} \quad (3.1)$$

où n est le nombre de balancements de la pièce.

Les moyennes des écarts de mesure sont données au tableau.3.3

Tableau.3.3. Moyennes des écarts de mesure de la rectitude de la semelle

N°	Moyennes des écarts de mesure en mm	N°	Moyennes des écarts de mesure en mm
1	0.0000	12	0.0436
2	0.0150	13	0.0450
3	0.0140	14	0.0456
4	0.0286	15	0.0414
5	0.0316	16	0.0420
6	0.0362	17	0.0380
7	0.0388	18	0.0352
8	0.0388	19	0.0328
9	0.0396	20	0.0284
10	0.0442	21	0.0228
11	0.0412	22	0.0000

- Le défaut de forme nominal de la rectitude par les moyennes des écarts de mesure est égal à : $0.0456 - 0.0000 = 0.0456$ mm.

3.2.2. Contrôle de la rectitude par machine à mesurer tridimensionnelle de la semelle

Le contrôle est fait sur la même pièce "semelle" avec les mêmes points sur la MMT illustré par la figure.3.3. On pose la pièce sur le marbre de la MMT. Le métrologue fait déplacer le capteur manuellement tout en palpant successivement les points désignés sur la droite de la surface. Le logiciel enregistre les coordonnées correspondant à chaque point palpé.

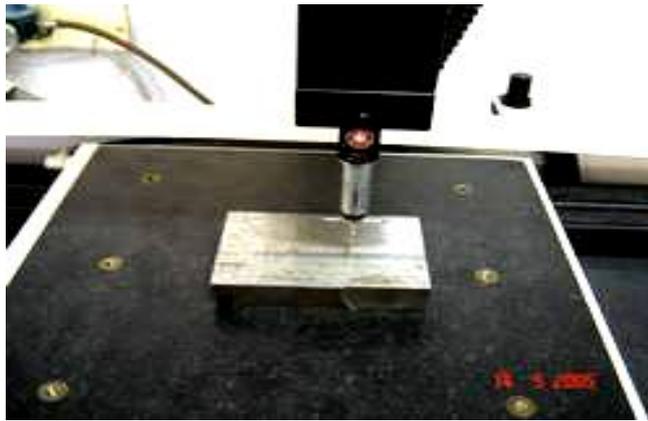


Fig.3.3. Contrôle de la rectitude par MMT

Les coordonnées des points saisis (ω_i) sont dressées au tableau.3.4 des différents points palpés de la semelle.

Tableau.3.4. Coordonnées des points de la rectitude de la semelle

No.	X	Y	Z
1	-71.9746	-79.3258	-132.6019
2	-68.0381	-79.3258	-132.5909
3	-62.9060	-79.3263	-132.5794
4	-57.4935	-79.3258	-132.5679
5	-52.9234	-79.3263	-132.5589
6	-47.6854	-79.3253	-132.5534
7	-42.3908	-79.3268	-132.5494
8	-37.7652	-79.3258	-132.5469
9	-32.8837	-79.3258	-132.5459
10	-27.3341	-79.3258	-132.5459
11	-22.9676	-79.3263	-132.5394
12	-17.8360	-79.3248	-132.5439
13	-12.5814	-79.3243	-132.5444
14	-8.0339	-79.3248	-132.5439
15	-2.4448	-79.3233	-132.5429
16	1.8387	-79.3238	-132.5459
17	7.0138	-79.3233	-132.5444
18	11.9909	-79.3228	-132.5459
19	16.7144	-79.3228	-132.5499
20	21.6850	-79.3228	-132.5539
21	26.9190	-79.3228	-132.5544
22	31.4201	-79.3213	-132.5649

3.2.2.1. Illustration graphique des points palpés et le défaut de rectitude (ou étendue)

Le logiciel de la machine « Métromec » calcule par les moindres carrés, la droite géométrique idéale associée et donne sa représentation avec la répartition des points palpés illustrés par la figure.3.4. Cette droite se trouve entre l'écart de mesure maximum de 0.0165mm du 11^{ème} point palpé et l'écart de mesure minimum de -0.0319mm du 1^{er} point palpé .

Le défaut de rectitude de la semelle est égale à : $0.0165 - (-0.0319) \approx 0.0485\text{mm}$.

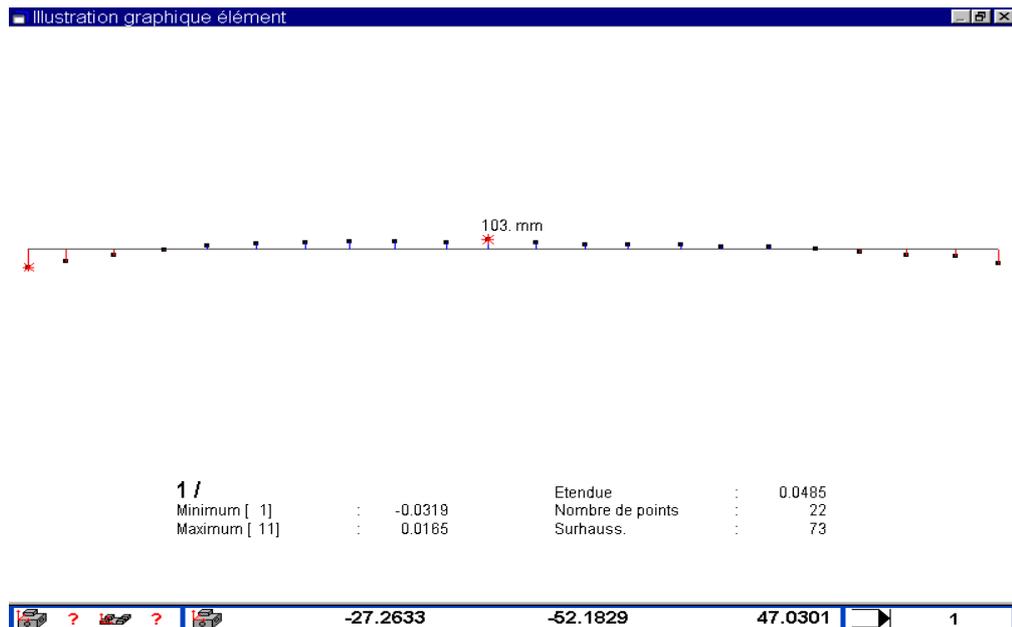


Fig.3.4. Illustration graphique des 22 points palpés et étendue

3.2.2.2. Constatation

D'après le tableau.3.4 le défaut de forme nominal $Df_n = Z_{\max} - Z_{\min} = 132.6019 - 132.5394 = 0.0625$ mm. Il représente le défaut de parallélisme par rapport au plan (x, y).

Après calcul et association du nuage de points, le défaut de rectitude est alors égal à : 0.0485mm

3.2.3. Contrôle sur marbre à l'aide du comparateur de la seconde pièce "glissière"

A l'aide d'une règle graduée et avec un stylo feutre, on trace sur la surface de la glissière une ligne droite sur laquelle on désigne vingt et un points distants de 5mm.

Le contrôle de la rectitude de la glissière illustré par la figure.3.5 a été fait avec les instruments associés suivants : une barre sinus et des cales étalons. Pour la recherche de la droite géométrique idéale nominale, on règle le comparateur à "zéro" en palpant respectivement deux points éloignés

au maximum de la droite à contrôler. Ensuite on palpe les autres points en glissant le socle du comparateur sur le marbre tout en relevant les écarts de mesure.



Fig.3.5. Contrôle de la rectitude de la glissière

Ceux-ci sont donnés en termes d'abscisses x au tableau.3.5.

Tableau.3.5. Ecart de mesure et abscisses des points en x de la glissière

N°	Ecart de mesure $\xi_i = z_i$ (enmm)			N°	Ecart de mesure $\xi_i = z_i$ (enmm)		
	1 ^{er} balancement	2 ^{ème} balancement	x		1 ^{er} balancement	2 ^{ème} balancement	x
1	0.000	0.000	0	12	0.007	0.005	55
2	0.005	0.002	5	13	0.008	0.007	60
3	0.005	0.002	10	14	0.002	0.008	65
4	0.006	0.009	15	15	0.002	0.005	70
5	0.006	0.007	20	16	0.009	0.004	75
6	0.008	0.006	25	17	0.003	0.003	80
7	0.007	0.009	30	18	0.001	0.002	85
8	0.010	0.009	35	19	0.000	0.001	90
9	0.010	0.008	40	20	0.000	0.002	95
10	0.008	0.009	45	21	0.000	0.000	100
11	0.009	0.008	50				

3.2.3.1. Calcul des défauts de forme nominaux

Les défauts de forme nominaux sont calculés à partir des valeurs maximales et minimales du tableau 3.5 de chaque balancement de la glissière et sont donnés au tableau 3.6.

Tableau.3.6. Défauts de forme nominaux de la rectitude de la glissière

Défauts de forme nominaux $Df_n = \sup\{\xi_i\} - \inf\{\xi_i\}$	
1 ^{er} balancement	2 ^{ème} balancement
0.01	0.009

3.2.3.2. Constatation

On constate d'après les résultats du tableau.3.5 que les écarts de mesure ne sont identiques.

On peut avoir d'autres écarts de mesure et défauts de forme pour d'autres balancements de la pièce et pour d'autres réglages de la droite géométrique idéale nominale.

On conclut qu'il n'y a pas de répétitivité dans la plupart des résultats de la rectitude de la glissière.

Les écarts de mesure quantifient les fluctuations des valeurs observées autour de la valeur centrale ; dans ce cas une moyenne arithmétique des écarts de mesure s'avère très nécessaire.

3.2.3.3. Calcul des moyennes arithmétiques des écarts de mesure ξ_i

Les moyennes arithmétiques des écarts de mesure sont données au tableau.3.7.

Tableau.3.7. Moyennes arithmétiques des écarts de mesure de la rectitude de la glissière

N°	Moyennes des écarts de mesure	N°	Moyennes des écarts de mesure
1	0.0000	12	0.0060
2	0.0035	13	0.0075
3	0.0035	14	0.0050
4	0.0075	15	0.0035
5	0.0065	16	0.0065
6	0.0070	17	0.0030
7	0.0080	18	0.0015
8	0.0095	19	0.0005
9	0.0090	20	0.0010
10	0.0085	21	0.0000
11	0.0085		

- Le défaut de forme nominal de la rectitude par les moyennes des écarts de mesure est égal à :

$$0.0095 - 0.0000 = 0.0095 \text{ mm.}$$

3.2.4. Contrôle de la rectitude par machine à mesurer tridimensionnelle de la glissière

Le contrôle illustré par la figure.3.6 a été fait en deux balancements sur la même pièce "glissière" et sur les mêmes points palpés.

On pose la pièce sur le marbre de la MMT.

Le métrologue fait déplacer le capteur manuellement tout en palpant successivement les points désignés sur la droite de la surface.

Le logiciel enregistre les coordonnées correspondant à chaque point palpé.



Fig.3.6. Contrôle de la rectitude de la glissière

Les coordonnées des points saisis (ω_i) de la 1^{ère} mesure de la glissière sont données sur le tableau.3.8.

Tableau.3.8. Coordonnées des points de la rectitude de la glissière (1^{ère} mesure)

No.	X	Y	Z
1	-81.1254	-66.6220	-111.1993
2	-76.4728	-66.6235	-111.1968
3	-70.6028	-66.6250	-111.1938
4	-65.6812	-66.6250	-111.1933
5	-60.7077	-66.6245	-111.1938
6	-55.7361	-66.6255	-111.1923
7	-50.7225	-66.6255	-111.1938
8	-45.7110	-66.6260	-111.1923
9	-40.9109	-66.6265	-111.1928
10	-35.8434	-66.6265	-111.1908
11	-30.1848	-66.6255	-111.1948
12	-25.7762	-66.6260	-111.1958
13	-20.8002	-66.6275	-111.1913
14	-15.8006	-66.6270	-111.1978
15	-11.2301	-66.6280	-111.1978
16	-5.8785	-66.6280	-111.1943
17	-0.6454	-66.6275	-111.1988
18	4.6826	-66.6270	-111.1993
19	8.8582	-66.6270	-111.2008
20	14.7743	-66.6260	-111.2008
21	19.2278	-66.6260	-111.1988

3.2.4.1. Illustration graphique des points palpés et défaut de rectitude de la 1^{ère} mesure

Le logiciel de la machine « Métromec » calcule par les moindres carrés, la droite géométrique idéale associée et donne sa représentation avec la répartition des points palpés illustrés par la figure.3.7. Cette droite se trouve entre l'écart de mesure maximum de 0.0049mm du 13^{ème} point palpé et l'écart de mesure minimum de -0.0063mm du 1^{er} point palpé.

Le défaut de rectitude de la glissière est égale à : $0.0049 - (-0.0063) = 0.0112$ mm.

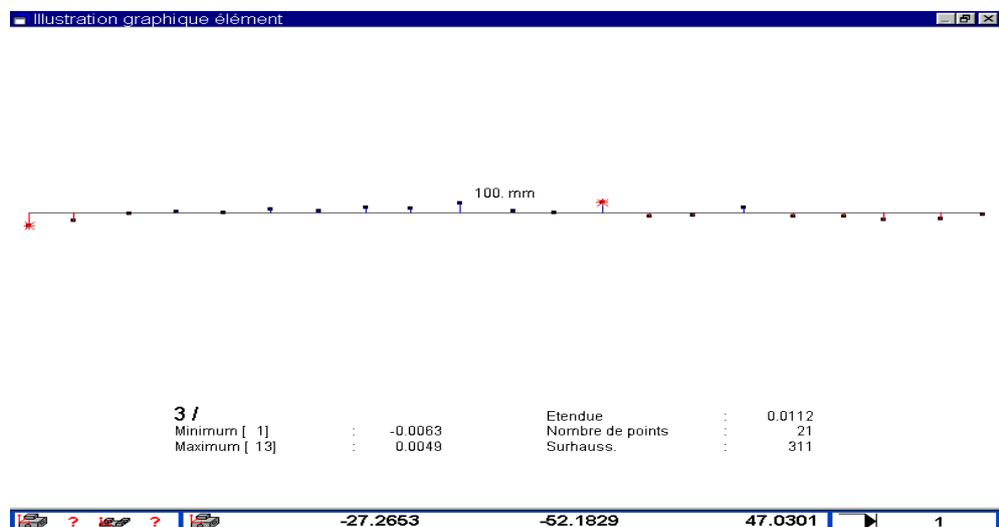


Fig.3.7. Illustration graphique des 21 points palpés de la glissière et étendue

- Les défauts de rectitude de la glissière, calculés par le logiciel des deux mesures sont donnés au tableau.3.9.

Tableau.3.9. Défauts de rectitude (ou étendue) de la glissière

Défauts de rectitude	
1 ^{er} balancement	2 ^{ème} balancement
0.0112	0.0119

3.2.4.1. Constatation

A partir du tableau.3.8, le défaut de forme nominal $Df_n = Z_{\max} - Z_{\min} = 111.2008 - 111.1913 = 0.0095$ mm. Il représente le défaut de parallélisme par rapport au plan (x, y).

D'après le tableau.3.9, on constate que le résultat des défauts de rectitude obtenu par la MMT est presque identique.

3.3. Application du contrôle de la planéité

3.3.1. Contrôle sur marbre à l'aide du comparateur de la pièce "palier moteur"

L'usinage de la surface à contrôler de la pièce représentée par la figure.3.8 a été usinée sur un tour parallèle conventionnel. L'intervalle de tolérance (IT_f) imposé est de 0.02mm.

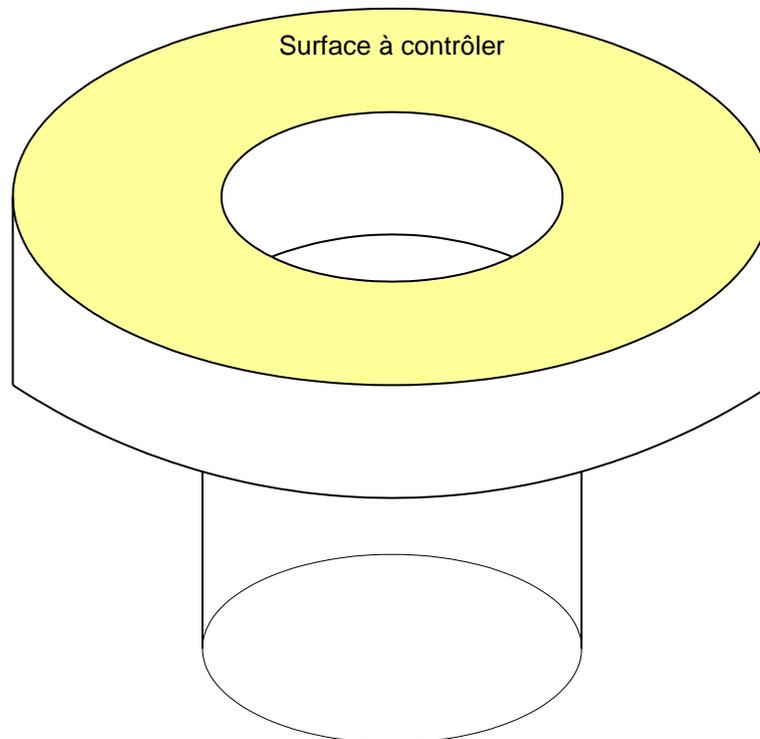


Fig.3.8. Surface à contrôler du palier moteur

La division de la surface à contrôler en angles de $22^{\circ} 30'$ pour obtenir une répartition régulière sur toute la surface était faite sur un gabarit en carton représenté sur la figure.3.9 avec de petits cercles perforés.

Ce gabarit est posé sur la surface (S) de la pièce et on a exécuté le tracé de ces petits cercles avec un stylo feutre. Les points à palper sont pris dans ces petits cercles à l'intersection des deux cercles intermédiaires de la pièce et les angles construits.

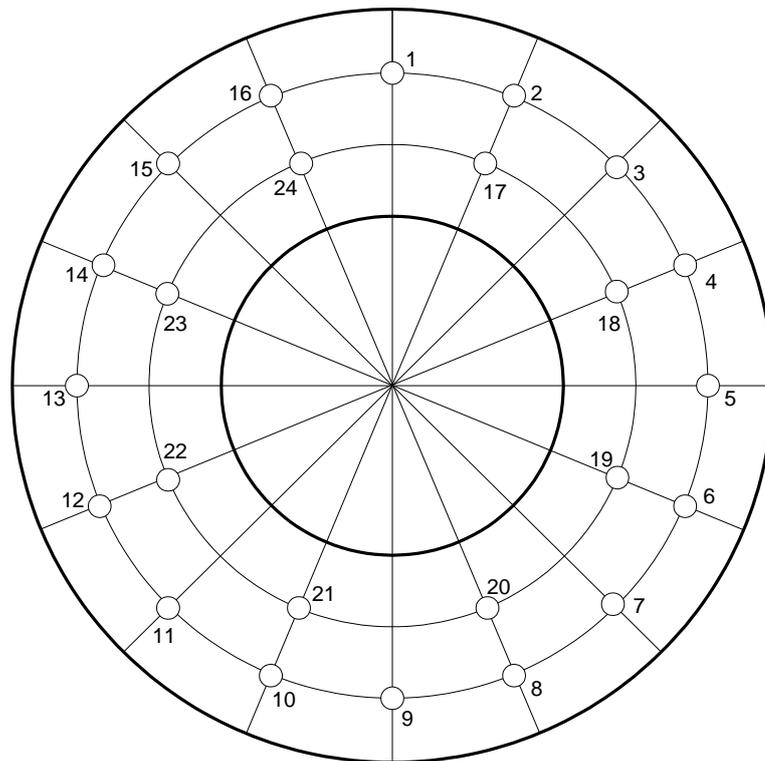


Fig.3.9.Gabarit en carton

On dispose d'un marbre sur lequel on pose le socle d'un comparateur à cadran (précision de 0.01mm) et de trois vérins réglables en les plaçant en forme de triangle.

Ensuite, on pose la pièce "palier" sur les trois vérins. On met le palpeur du comparateur en contact et perpendiculaire à la surface (S). On règle facilement les vérins avec leurs têtes de vis moletées pour que le comparateur marque "zéro" respectivement en trois points (A, B et C) de la surface à contrôler (S) répartis en triangle. Les trois points (A, B et C) sont parmi les points à palper. Le plan (ABC) est maintenant parallèle à la surface de référence du marbre ; il définit ainsi la surface géométrique idéale nominale (ou initiale) de mesure illustrée par la figure.3.10a. Enfin, on palpe tous les autres points de la surface à contrôler par le palpeur du comparateur en faisant glisser son socle sur le marbre tout en relevant leurs écarts de mesure ξ_i de parallélisme entre (S) et (M) qui sont identiques aux écarts de planéité.

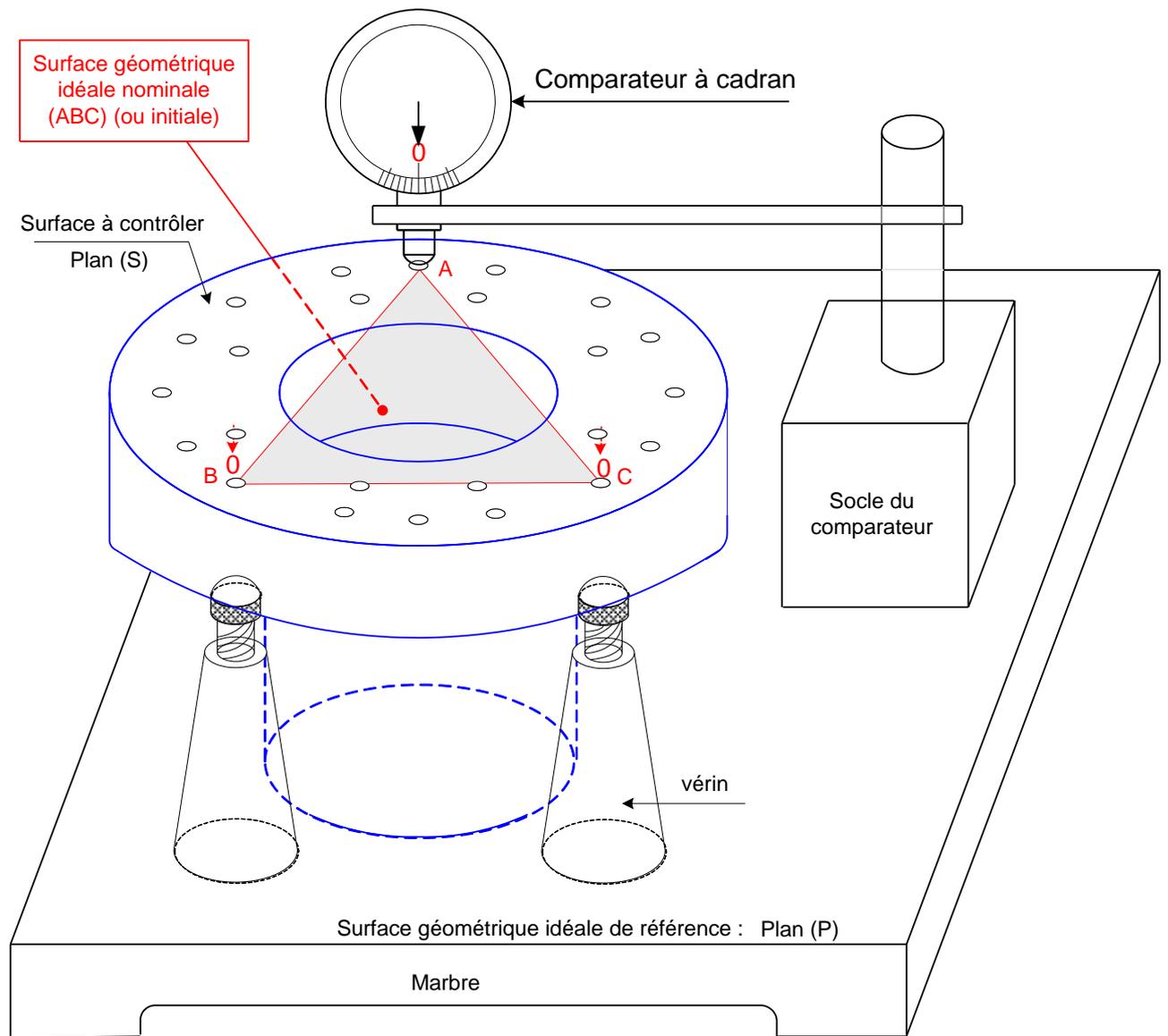


Fig.3.10a. Contrôle de la planéité du palier moteur sur marbre

On enlève la pièce de son emplacement puis on la balance à nouveau manuellement sur les vérins et on recommence les opérations de contrôle citées avant pour palper les mêmes points de la surface réelle illustrés par la figure.3.10b.

Les points A, B et C sont pris tout juste au dessus des emplacements des vérins parmi les 24 points à palper .

Les écarts de mesure $\xi_i = z_i$ des 24 points du plan réel (S) pour les cinq "balancements" de la pièce fabriquée sont donnés avec leurs coordonnées en x_i et y_i sur le plan (S) au tableau 3.10.



Fig.3.10b. Contrôle de la planéité du palier moteur sur marbre

Tableau.3.10. Ecart de mesure de la planéité

N° de pts	Ecart de mesure $\xi_i = z_i$ (en mm)					Coordonnées	
	1 ^{er} balance-ment	2 ^{ème} balance-ment	3 ^{ème} balance-ment	4 ^{ème} balance-ment	5 ^{ème} balance-ment	x_i (mm)	y_i (mm)
1	0.000	+0.005	+0.010	-0.008	-0.008	00	42
2	-0.001	0.000	0.000	-0.005	+0.005	15	38
3	-0.003	+0.020	+0.004	0.000	+0.004	30	29
4	-0.004	+0.002	-0.004	-0.005	0.000	38	15
5	-0.003	-0.010	0.000	-0.010	-0.010	42	00
6	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.020	37	-16
7	-0.009	0.000	-0.010	0.000	-0.020	30	-30
8	-0.008	-0.009	-0.010	0.000	-0.025	15	-39
9	-0.008	-0.020	-0.010	+0.001	-0.018	00	-40
10	0.000	-0.008	-0.005	0.000	0.000	-15	-38
11	0.000	-0.012	0.000	+0.002	+0.008	-29	-29
12	0.000	-0.008	+0.014	-0.008	+0.008	-38	-15
13	+0.005	0.000	+0.015	-0.005	+0.001	-42	00
14	+0.022	+0.018	+0.018	0.000	+0.012	-39	16
15	+0.002	+0.011	+0.009	+0.008	0.000	-29	30
16	-0.004	+0.010	0.000	0.000	+0.005	-15	39
17	-0.003	-0.020	-0.010	-0.020	-0.002	12	27
18	-0.010	-0.030	-0.003	-0.003	-0.010	27	10
19	-0.003	-0.020	0.000	-0.012	-0.010	27	-11
20	+0.002	-0.020	-0.003	-0.009	-0.010	10	-27
21	-0.009	-0.011	0.000	-0.010	-0.009	-10	-27
22	0.000	-0.010	+0.003	-0.005	0.000	-26	-10
23	+0.010	-0.004	+0.005	-0.008	-0.001	-26	12
24	+0.006	-0.005	+0.002	-0.006	+0.004	-11	28

3.3.1.1. Calcul des défauts de forme nominaux

A partir du tableau.3.10, on calcule les défauts de forme nominaux qui sont donnés au tableau.3.11.

Tableau.3.11. Défauts de forme nominaux de la planéité

Défauts de forme nominaux $Df_n = \sup\{\xi_i\} - \inf\{\xi_i\}$ en mm				
1 ^{er} balancement	2 ^{ème} balancement	3 ^{ème} balancement	4 ^{ème} balancement	5 ^{ème} balancement
0.029	0.050	0.028	0.028	0.037

3.3.1.2. Constatation

On constate d'après le tableau.3.10 que les écarts de mesure ξ_i de chaque point palpé ne sont pas toujours égaux à la même valeur des cinq balancements de la pièce. La valeur du défaut de forme nominal d'après le tableau.3.11 n'est pas la même. On peut avoir d'autres écarts de mesure ξ_i et défauts de forme différents pour d'autres balancements de la pièce et pour d'autres points palpés.

On conclut qu'il n'y a pas de répétitivité dans la plupart des résultats de la planéité du palier moteur. Les écarts de mesure quantifient les fluctuations des valeurs observées autour de la valeur centrale ; dans ce cas une moyenne arithmétique des écarts de mesure s'avère très nécessaire.

3.3.1.3. Calcul des moyennes arithmétiques des écarts de mesure ξ_i

Les moyennes arithmétiques des écarts de mesure sont données au tableau.3.12.

Tableau.3.12. Moyennes arithmétiques des écarts de mesure de la planéité

N°	Moyennes des écarts de mesure	N°	Moyennes des écarts de mesure
1	-0.0002	13	+0.0032
2	-0.0002	14	+0.0150
3	+0.0050	15	+0.0060
4	-0.0022	16	+0.0022
5	-0.0066	17	-0.0110
6	-0.0040	18	-0.0112
7	-0.0078	19	-0.0090
8	-0.0104	20	-0.0052
9	-0.0110	21	-0.0078
10	-0.0026	22	-0.0024
11	-0.0004	23	+0.0004
12	+0.0012	24	+0.0002

- Le calcul du défaut de forme nominal de la planéité par les moyennes des écarts de mesure du tableau.3.12 est égal à :

$$0.0150 - (-0.0112) = 0.0262 \text{ mm}$$

3.3.2. Contrôle de la planéité par machine à mesurer tridimensionnelle

Le contrôle de la planéité a été fait pour trois balancements de la pièce "palier". A chaque balancement, on a palpé les mêmes points de la surface à contrôler désignés au paragraphe 3.3.1..

-Premier balancement : La surface à contrôler est parallèle au marbre de la MMT illustrée par la figure.3.11.

On pose la pièce sur le marbre de la MMT.

Le métrologue fait déplacer le capteur manuellement tout en palpant successivement les points désignés sur la surface à contrôler.

Le logiciel enregistre les coordonnées correspondant de chaque point palpé.

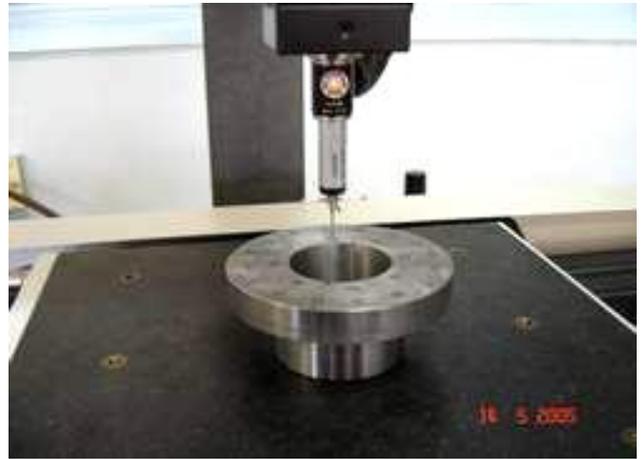


Fig.3.11. Contrôle de la planéité du palier sur MMT

Les coordonnées des points palpés sont données au tableau.3.13

Tableau.3.13. Listing des coordonnées des points palpés du premier balancement

No.	X	Y	Z
1	-34.1648	59.7709	-106.2695
2	-34.0860	-9.7500	-106.3199
3	26.0406	24.2782	-106.3574
4	-19.1706	66.3939	-106.2795
5	-2.7694	65.3739	-106.2970
6	11.9068	58.7580	-106.3179
7	22.2719	46.4881	-106.3379
8	29.0196	29.8867	-106.3564
9	26.3301	13.7133	-106.3649
10	26.1806	13.9613	-106.3649
11	18.7166	-1.4096	-106.3679
12	7.0280	-11.8500	-106.3624
13	-8.7102	-16.8314	-106.3499
14	-26.0729	-15.7004	-106.3299
15	-40.6441	-7.8515	-106.3089
16	-51.4903	4.2404	-106.2875
17	-55.6539	19.1963	-106.2730
18	-54.9044	35.2646	-106.2625
19	-47.0009	51.3360	-106.2595
20	-18.3136	54.1555	-106.2990
21	3.4962	47.7706	-106.3274
22	15.1459	27.5422	-106.3544
23	10.0405	7.0644	-106.3624
24	-10.4812	-4.6215	-106.3489
25	-32.3215	1.7444	-106.3219
26	-43.7723	21.1468	-106.2950
27	-37.0668	43.1166	-106.2875

-Deuxième balancement : La surface à contrôler est parallèle au marbre de la MMT.

Les coordonnées des points palpés sont données au tableau.3.14 par le palpé des mêmes points pour le deuxième balancement de la pièce.

Tableau.3.14. Listing des coordonnées des points palpés du second balancement

No.	X	Y	Z
1	-34.3413	59.6105	-106.2685
2	-19.3711	66.5269	-106.2790
3	-3.2479	65.0134	-106.2980
4	11.6768	58.9040	-106.3179
5	22.1094	46.2711	-106.3384
6	28.3696	29.3002	-106.3564
7	25.9581	24.9967	-106.3589
8	26.3206	13.5193	-106.3654
9	18.9351	-1.5036	-106.3684
10	7.4860	-12.0350	-106.3634
11	-8.6617	-17.2159	-106.3504
12	-25.4909	-15.3579	-106.3314
13	-33.8210	-10.4845	-106.3199
14	-39.6696	-6.9635	-106.3104
15	-51.1313	4.2849	-106.2880
16	-55.3719	19.0963	-106.2745
17	-54.4104	35.0741	-106.2645
18	-46.5304	51.3215	-106.2610
19	-18.4496	53.8625	-106.2999
20	3.1417	46.4021	-106.3294
21	14.5719	27.3817	-106.3549
22	9.9354	7.9259	-106.3629
23	-10.2153	-5.0890	-106.3494
24	-31.8670	2.3159	-106.3229
25	-43.6973	21.0343	-106.2960
26	-37.1723	43.0341	-106.2880

-Troisième balancement : La surface à contrôler est inclinée par rapport au marbre de la MMT illustrée par la figure.3.12.

On pose la surface inférieure de la pièce sur le marbre de la MMT et sur une cale étalon.

Celle-ci est posée sur le marbre.

Le métrologue fait déplacer le capteur manuellement tout en palpant successivement les points désignés sur la droite de la surface.

Le logiciel enregistre les coordonnées correspondant à chaque point palpé.

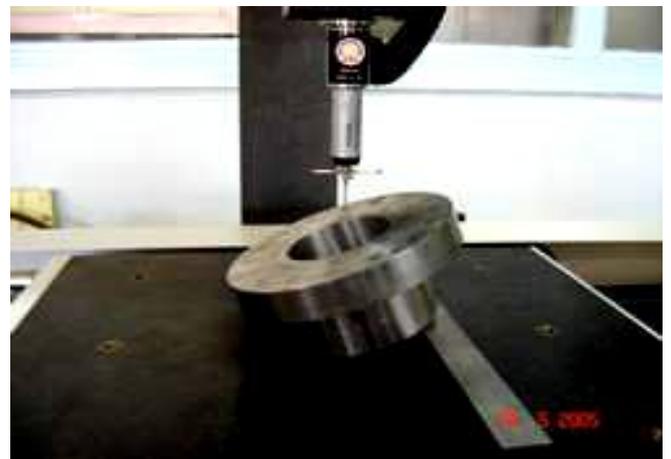


Fig.3.12 Contrôle de la planéité du palier sur MMT

Les coordonnées des points palpés du troisième balancement sont données au tableau.3.15.

Tableau.3.15. Listing des coordonnées des points palpés du troisième balancement

No.	X	Y	Z
1	-43.9127	63.9802	-104.9632
2	7.3882	19.9268	-87.7934
3	-54.0241	-5.2826	-105.9862
4	-28.6193	68.5892	-100.3804
5	-13.3945	64.6403	-95.5616
6	-0.5071	55.8394	-91.3168
7	7.8411	41.6382	-88.3089
8	11.0513	25.2307	-86.8204
9	6.3063	8.8244	-87.7884
10	-2.9374	-4.5712	-90.2358
11	-16.1071	-13.4558	-94.0322
12	-31.4020	-15.5663	-98.6905
13	-47.2194	-12.0583	-103.6788
14	-59.3682	-1.6885	-107.7441
15	-68.1340	11.4197	-110.8455
16	-69.7321	26.9152	-111.8084
17	-66.6756	42.7765	-111.3460
18	-57.2104	57.3912	-108.8666
19	-29.8913	55.4538	-100.3869
20	-9.8888	46.7497	-93.9487
21	-2.2940	24.4326	-90.9283
22	-10.0356	4.4800	-92.7122
23	-30.9950	-2.9439	-98.9575
24	-50.8580	6.3722	-105.3722
25	-58.4803	27.1968	-108.3546
26	-48.9397	47.5849	-106.0287

3.3.2.1. Calcul des étendues des défauts de forme nominaux

Le tableau.3.16 donne les défauts de forme nominaux de la planéité, ils sont calculés à partir du tableau.3.13, du tableau.3.14 et du tableau.3.15.

Ils représentent les défauts de parallélisme par rapport au plan (x, y).

Tableau.3.16. Défauts de forme nominaux de la planéité

$Df_n = \sup\{\xi_i\} - \inf\{\xi_i\}$ (en mm)		
1 ^{er} balancement	2 ^{ème} balancement	3 ^{ème} balancement
106.3679 – 106.2595 = 0.1084	106.3684 – 106.2610 = 0.1074	111.8084 – 86.8204 = 24.9880

- Le compte rendu des résultats de la machine donné au tableau.3.17 représente les étendues des trois balancements du palier, les défauts de forme nominaux notés par (d), les écarts entre les valeurs nominales et réelles des points palpés maximaux et minimaux et le pourcentage de profit.

Tableau.3.17. Compte rendu des résultats de la planéité

ENSET Oran - Dépt de Mécanique - Laboratoire de Métrologie Dimensionnelle									
n°	élément caractéristique			n° réf.	pp	etendue	nom nom	nom ecart	Mise à profit tol.
	val. nominale	tol.	limit sup.						
	Plan, palpé			1	--	27	0.0126		
	1 Caract.min-max (Z) [min max dist]								
	min -106.4000		0.1000			-0.1000	min -106.3679	X 0.0321	32% ----,*----
	max -106.3000		0.1000			-0.1000	max -106.2595	Y 0.0406	41% ----,*----
	d 0.1000		0.1000			-0.1000	d 0.1085	Z 0.0085	8% ----,*----
	Plan, palpé			1	--	27	0.0126		
	2 Planéité								
	0.0000		t= 0.1000				0.0126	0.0126	13% .,*-----
	Plan, palpé			2	--	26	0.0131		
	3 Planéité								
	0.0000		t= 0.1000				0.0131	0.0131	13% .,*-----
	Plan, palpé			3	--	26	0.0122		
	4 Caract.min-max (Z) [min max dist]								
	min -111.8000		0.1000			-0.1000	min -111.8084	X -0.0084	-8% ----,*----
	max -86.8000		0.1000			-0.1000	max -86.8204	Y -0.0204	-20% ----,*----
	d 25.0000		0.1000			-0.1000	d 24.9880	Z -0.0120	-12% ----,*----
	Plan, palpé			3	--	26	0.0122		
	5 Planéité								
	0.0000		t= 0.0250				0.0122	0.0122	49% ----,*----

3.3.2.2. Défauts de planéité

Le logiciel calcule les défauts de planéité (ou étendues) comme le montre le tableau.3.17, obtenus par association du nuage de points. Les défauts de planéité sont illustrés par le tableau.3.18 pour les trois balancements de la pièce.

Tableau.3.18. Défauts de planéité (ou étendues)

Défauts de planéité en mm		
1 ^{er} balancement	2 ^{ème} balancement	3 ^{ème} balancement
0.0126	0.0131	0.0122

- Illustration graphique des points palpés du 3^{ème} balancement et défaut de planéité

Le logiciel de la machine « Métromec » donne une illustration graphique des points palpés du 3^{ème} balancement comme le montre la figure.3.13. Il donne également l'étendue (ou défaut de planéité) entre l'écart de mesure maximum de 0.0042mm du 18^{ème} point palpé et l'écart de mesure minimum de -0.0079 du 24^{ème} point palpé.

L'étendue (ou défaut de planéité) de la surface à contrôler du palier est égale à :

$$0.0042 - (-0.0079) \approx 0.0112\text{mm.}$$

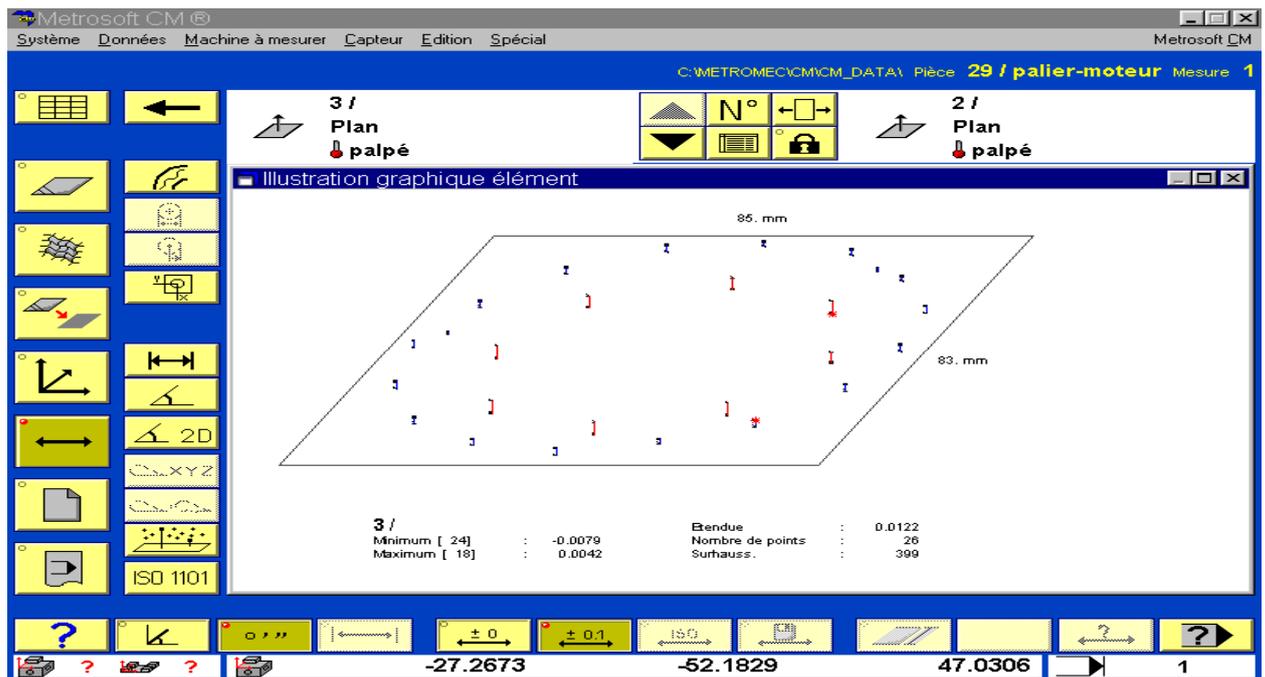


Fig.3.13. Illustration graphique des points palpés du 3^{ème} balancement

3.3.2.3. Constatation

On constate d'après le tableau.3.18 que le résultat des étendues de la surface à contrôler par la machine à mesurer tridimensionnelle est presque identique au centième près et même au micron près pour les. trois balancements de la pièce "palier moteur".

On conclut donc qu'il y'a une répétitivité du résultat du contrôle.

3.4. Application du contrôle de la circularité

3.4.1 Contrôle sur marbre à l'aide du comparateur de la pièce "roulement"

Le comparateur utilisé est d'une précision de 0.5μ .

L'opération de contrôle consiste à poser un vé de 90° sur un marbre ensuite à placer le roulement sur les deux faces de ce vé.

Par un stylo feutre, on trace une ligne circulaire sur le diamètre extérieur du roulement sur laquelle on désigne des points distants à palper.

Le réglage à "zéro" du comparateur se fait en positionnant sa touche sur la ligne circulaire du roulement en faisant déplacer latéralement et alternativement l'ensemble (vé + roulement) jusqu'à détection du point maximum sur son diamètre extérieur qui sera le diamètre (D_o) illustré par la figure.3.14. Le diamètre (D_o) représente le diamètre du cercle géométrique idéal nominal.



Fig.3.14. Contrôle de la circularité (roulement)

En faisant tourner manuellement le roulement en rotation sans le déplacer sur le vé et en palpant les points déjà repérés par le capteur tout en relevant leurs écarts de mesure.

On répète cette opération pour trois balancements de la pièce. Les écarts de mesure des 23 points avec leurs coordonnées x et y sont donnés au tableau.3.19.

Tableau.3.19. Ecart de mesure de la circularité du roulement

N°	Ecart de mesure $\xi_j = z_i$ en micron			x_i (mm)	y_i (mm)
	1 ^{er} balancement	2 ^{ème} balancement	3 ^{ème} balancement		
1	0.00	0.00	0.00	0	45
2	-1.05	0.00	-0.50	12.5	43
3	1.00	1.00	1.50	22.5	38.5
4	1.00	2.00	2.50	30	33.5
5	1.00	1.00	2.00	37.5	25
6	0.50	3.50	10.00	42.5	14
7	1.80	2.80	3.00	45	00
8	-1.80	2.80	1.00	43	-11
9	-0.50	-1.50	3.00	39	-21.8
10	-0.50	0.50	2.50	32	-31.2
11	2.50	2.80	4.00	20	-39.5
12	3.50	3.50	5.00	7.5	-44
13	3.00	2.40	4.00	-4	-44.7
14	4.50	2.00	4.00	-19.5	-40
15	5.00	7.00	7.50	-26	-36.5
16	7.50	8.50	6.50	-35	-28
17	6.00	8.50	11.50	-42	-16.5
18	5.50	4.00	7.50	-44.5	-3.5
19	4.00	4.00	7.00	-43.5	10
20	3.00	6.00	11.00	-39	22
21	6.50	5.50	6.00	-31.5	31.5
22	4.00	7.80	7.00	-23	38
23	3.00	3.00	5.00	-12	43

3.4.1.1. Calcul des défauts de forme nominaux de la circularité

A partir du tableau.3.19, on calcule les défauts de forme nominaux de la circularité qui sont donnés sur le tableau .3.20.

Tableau.3.20. Défauts de forme nominaux de la circularité

$Df_n = \sup\{\xi_j\} - \inf\{\xi_j\}$ en mm		
1 ^{er} balancement	2 ^{ème} balancement	3 ^{ème} balancement
0.0075 - (-0.00105) = 0.0085	0.0085 - (-0.0015) = 0.0100	0.0115 - (-0.0005) = 0.0120

3.4.1.2. Constatation

On constate d'après le tableau.3.19 que les écarts de mesure ξ_j de chaque point palpé ne sont pas toujours égaux à la même valeur des trois balancements de la pièce. La valeur du défaut de forme nominal d'après le tableau.3.20 n'est pas la même. On peut avoir d'autres écarts de mesure ξ_j et défauts de forme différents pour d'autres balancements de la pièce et pour d'autres points palpés. On conclut qu'il n'y a pas de répétitivité dans la plupart des résultats de la circularité du roulement.

Les écarts de mesure quantifient les fluctuations des valeurs observées autour de la valeur centrale ; dans ce cas une moyenne arithmétique des écarts de mesure s'avère très nécessaire.

3.4.1.3. Calcul des moyennes arithmétiques des écarts de mesure de la circularité

Les moyennes arithmétiques des écarts de mesure sont données au tableau.3.21.

Tableau.3.21. Moyennes arithmétiques des écarts de mesure de la circularité (en micron)

N°	Moyennes des écarts de mesure	N°	Moyennes des écarts de mesure
1	0.00	13	3.13
2	-0.51	14	3.50
3	1.16	15	6.50
4	1.83	16	7.50
5	1.33	17	8.66
6	4.66	18	5.66
7	2.53	19	5.00
8	0.60	20	6.66
9	0.33	21	6.00
10	0.83	22	6.26
11	3.10	23	3.66
12	4.00		

- Le calcul du défaut de forme de la circularité par les moyennes des écarts de mesure du tableau.3.21 est égal à : $8.66 - (-0.51) = 9.17 \mu = 0.00917 \text{ mm}$

3.4.2. Contrôle de la circularité par la machine à mesurer tridimensionnelle

On pose le roulement sur le marbre de la MMT sur sa face latérale.

En faisant déplacer le capteur manuellement autour du diamètre extérieur du roulement tout en le mettant en contact successivement sur les points à palper. Le logiciel enregistre leurs coordonnées. Celles-ci sont données au tableau.3.22.

Tableau.3.22. Coordonnées des points de la circularité

No.	X	Y	Z	No.	X	Y	Z
1	-33.7239	-27.8641	0.0000	13	-31.0689	-117.7637	0.0000
2	-21.2454	-29.7135	0.0000	14	-45.0041	-116.4997	0.0000
3	-9.6929	-35.0066	0.0000	15	-58.0300	-110.9254	0.0000
4	-3.1895	-40.0850	0.0000	16	-69.0518	-101.1066	0.0000
5	3.3947	-47.8615	0.0000	17	-75.1570	-91.1049	0.0000
6	8.3049	-57.5868	0.0000	18	-78.0373	-82.2244	0.0000
7	10.7894	-68.7561	0.0000	19	-78.9902	-71.1343	0.0000
8	10.2406	-80.9663	0.0000	20	-77.2689	-60.4190	0.0000
9	6.8840	-91.6107	0.0000	21	-72.7310	-49.9101	0.0000
10	2.3358	-99.3740	0.0000	22	-66.7256	-41.9472	0.0000
11	-6.8339	-108.7173	0.0000	23	-56.2718	-33.7426	0.0000
12	-18.0704	-114.9373	0.0000				

- Répartition des points palpés sur le diamètre extérieur du roulement de la première mesure

Le logiciel calcule les écarts de circularité obtenus par association du nuage de points palpés par le critère des moindres carrés. La figure.3.15 montre leur répartition autour du cercle géométrique idéal associé (de couleur bleue) du roulement de diamètre égal à 89.9995mm. Celui-ci est compris entre un cercle en pointillés d'écart maximum de 0.0030mm illustré par le 15^{ème} point palpé et un cercle en pointillés d'écart minimum de -0.0023mm illustré par le 1^{er} point palpé. Les coordonnées de son centre sont : $x = -34.0233\text{mm}$ et $y = -72.8606\text{mm}$ par rapport au référentiel machine.

L'étendue de la circularité est égale à : $0.0030 - (-0.0023) = 0.0053\text{mm}$.

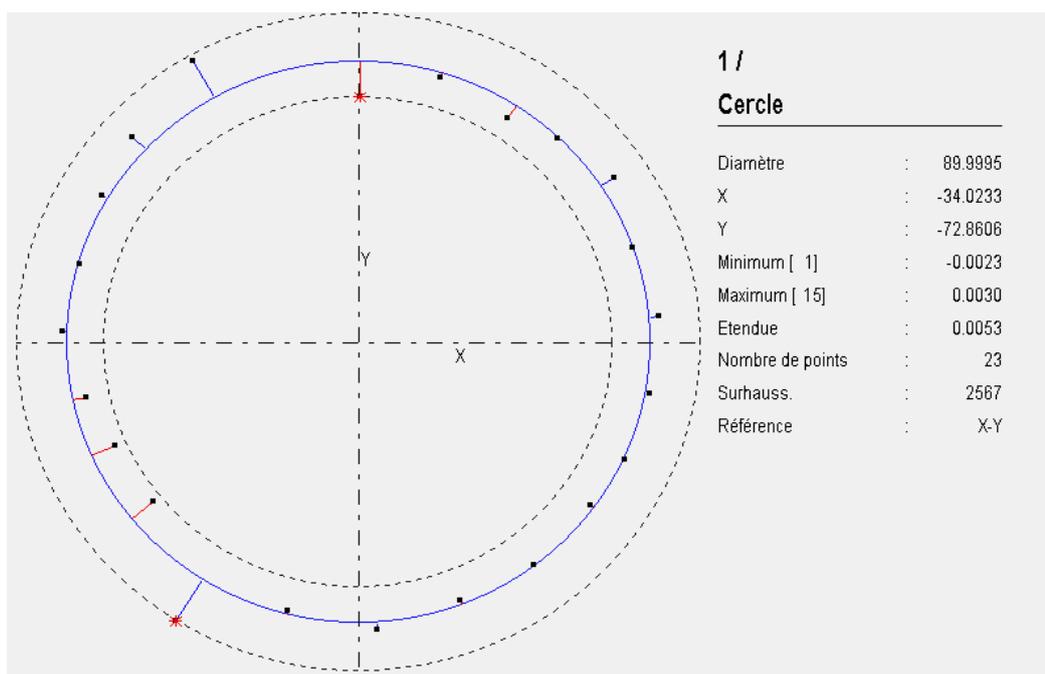


Fig.3.15. Répartition du nuage de points de la circularité et étendue

3.4.2.1. Défauts de circularité (ou étendue) du roulement

Les défauts de circularité de la première et seconde mesure du roulement sont calculés par le logiciel et sont donnés sur le tableau.3.23.

Tableau.3.23. Défauts de circularité

Défauts de circularité en mm	
1 ^{ère} mesure du roulement	2 ^{ème} mesure du roulement
0.0053	0.0079

3.4.2.1.Constatation

La valeur du défaut de circularité entre la première et la seconde mesure n'est pas la même car l'imprécision des points palpés a provoqué des erreurs dues au déplacement manuel du capteur.

3.5. Tableau récapitulatif des résultats

Tableau.3.24. Récapitulatif des résultats

Spécifications de forme et intervalles de tolérance IT_f	Pièces	Contrôle traditionnel		Contrôle par machine à mesurer tridimensionnelle	
		Défauts de forme nominaux en (mm)		Défauts de forme nominaux en (mm)	Etendues en (mm) après association
$IT_f=0.05$ Rectitude	Semelle	0.048, 0.050, 0.050, 0.055 0.050, 0.0456	0.0625	0.0485	
$IT_f=0.015$	Glissière	0.010, 0.009, 0.0095	0.0095,	<i>0.0112, 0.0119</i>	
Planéité $IT_f=0.02$	Palier	0.029, 0.050, 0.028, 0.028 0.037, 0.0262	<i>0.1085, 0.1074,</i> 24.980	<i>0.0126, 0.0131,</i> <i>0.0122</i>	
Circularité $IT_f=0.05$	Roulement	0.0085, 0.010, 0.012 0.00917	<i>0.0053, 0.0079</i>	

Le tableau.3.24 montre que les résultats des défauts de forme nominaux du contrôle traditionnel étaient très influencés par les perturbations des écarts de mesure constatées lors de leurs relevés qui ont été donnés par les différents tableaux précédents.

Alors que les résultats obtenus par la MMT (écrits en italique et en rouge) sont identiques au micron près.

3.6. Conclusion

A travers les résultats donnés par le tableau.3.24 et observés après l'étude expérimentale du contrôle conventionnel des spécifications géométriques de forme effectué sur les différentes pièces par la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) ; on conclut qu'il y'a une répétitivité et précision de ces résultats. Cela est dû à :

- l'absence de l'influence des erreurs de la surface de référence du marbre de la machine
- l'absence de l'influence des erreurs du balancement de la pièce (le positionnement).

Et à travers les valeurs des écarts de mesure ξ_i observées après l'étude expérimentale du contrôle traditionnel des spécifications géométriques de forme effectué sur les mêmes différentes pièces sur marbre et comparateur à cadran ; on conclut qu'il y'a une non répétitivité et imprécision de ces valeurs. Cela est dû à :

- l'influence d'erreurs sur la surface géométrique idéale nominale ou initiale de mesure
- l'influence d'erreurs de la surface de la pièce posée sur les vérins réglables
- l'influence d'erreurs de la surface du marbre sur laquelle glisse le socle du comparateur
- l'influence d'erreurs sur les deux surfaces des faces du vé
- le choix arbitraire de la direction générale de la surface à contrôler dû au balancement manuel de la pièce sur la surface de mesure.

Egalement , les défauts de forme nominaux donnés par le tableau.3.24 sont soumis à des fluctuations.

Pour cela dans le cas d'un contrôle, si le défaut de forme nominal Df_n ainsi trouvé est inférieur à l'intervalle de tolérance IT_f imposé par le contrôle, on conclue que la pièce est bonne ; dans le cas contraire où Df_n est supérieur à IT_f on ne peut pas affirmer que la pièce est hors tolérance mais conclure seulement que la pièce n'a pas été trouvée bonne, en effet un autre choix de n points parmi les points palpés correspondant à un autre balancement de la surface donnerait peut être une pièce bonne. Cette procédure de contrôle ne permettra jamais d'affirmer que le défaut de forme nominal Df_n ainsi trouvé est minimal.

L'opérateur doit définir par calcul un plan idéal optimisé. Le plan idéal optimisé est alors défini comme étant le plan passant au mieux des n plans associés. Cette étape ne s'applique que lorsque la métrologie est assistée par un calculateur, la surface géométrique idéale optimisée sera celle obtenue après un calcul d'optimisation, elle définit la direction générale de la surface.

Et pour pallier à ce problème de défaut de forme nominal Df_n ; nous proposons au chapitre IV une étude d'un modèle mathématique pour l'association de surfaces de formes géométriques suivantes : droite, plan et cercle avec leurs équations par le critère des moindres carrés.

On termine par l'élaboration d'un programme informatique CAO d'association de surfaces aux points palpés pour la détermination de la direction générale de la surface ou élément pour confirmer l'acceptation ou le rejet de la pièce ; cela est conçu dans le chapitre V.

CHAPITRE 4 Modèle mathématique du critère d'association de surfaces

4.1. Introduction

La définition géométrique d'un élément idéal est donnée par son équation mathématique. La surface fabriquée est définie par l'ensemble des points palpés M_i qui sont composés des coordonnées (x_i, y_i, z_i) représentées dans un repère cartésien.

Le critère des moindres carrés permet d'associer un élément idéal à un nuage de points en minimisant la somme des carrés des écarts des points n à l'élément idéal.

Si les d_i représentent les écarts des points M_i à l'élément géométrique idéal associé. Les propriétés mathématiques sont les suivantes :

- parmi tous les éléments idéaux associés possibles, l'élément idéal des moindres carrés est celui qui

$$\text{minimise la somme des carrés des écarts } d_i, \quad \sum_{i=1}^{i=n} d_i^2 \text{ minimal} \quad (4.1)$$

- l'élément idéal des moindres carrés passant au mieux, il n'est pas tangent du côté libre de la

$$\text{matière, la somme des écarts } d_i \text{ est nulle, } \sum_{i=1}^{i=n} d_i = 0 \quad (4.2)$$

On va déterminer les équations des trois éléments géométriques idéaux associés de la droite (rectitude), du plan (planéité) et du cercle (circularité).

4.2. Rectitude

Soit Z l'équation de la droite associée suivante :

$$Z = Ax + B \quad (4.3)$$

4.2.1. Régression en Z par rapport à X

Calcul des coefficients A et B

$$A = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i z_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n z_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (4.4)$$

et

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n z_i \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i z_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (4.5)$$

4.2.2. Régression en X par rapport à Z

Calcul des coefficients A' et B'

$$A' = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i z_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n z_i}{n \sum_{i=1}^n z_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n z_i \right)^2} \quad (4.6)$$

et

$$B' = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n z_i^2 - \sum_{i=1}^n z_i \sum_{i=1}^n x_i z_i}{n \sum_{i=1}^n z_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n z_i \right)^2} \quad (4.7)$$

Les x_i et z_i sont les coordonnées des points palpés qui forment le nuage de points et n représente leur nombre, la figure 4.1 montre la droite associée aux points palpés.

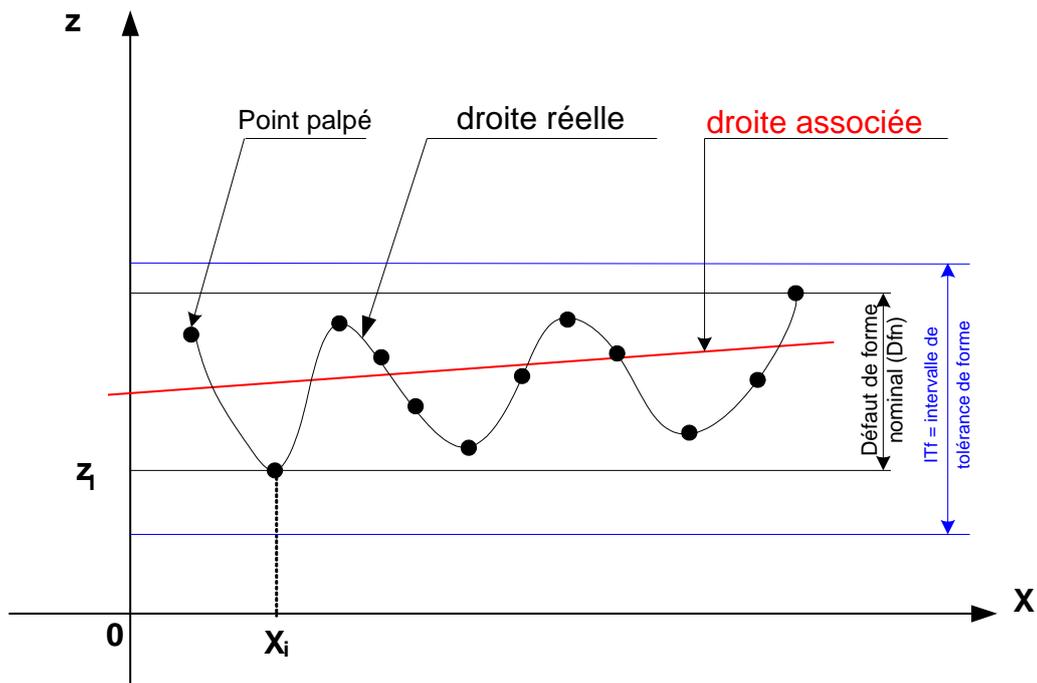


Fig.4.1. Droite associée de la rectitude

4.2.3. La structure du programme de calcul des paramètres est comme suite :

```
n=TableOccurrence("TABLE1")
//calcul de XZ[i]
POUR i=1 A n
VARXZ[i]=VARX[i]*VARZ[i]
```

```

FIN
//calcul de X carré
POUR i=1 A n
XCARRE[i]=Puissance(VARX[i],2)
FIN
//calcul de X carré
POUR i=1 A n
ZCARRE[i]=Puissance(VARZ[i],2)
FIN
//calcul de X barre
POUR i=1 A n
SI n<>0 ALORS
Xbarre=Xbarre+VARX[i]/n
FIN
FIN
//calcul de Z barre
POUR i=1 A n
SI n<>0 ALORS
Zbarre=Zbarre+VARZ[i]/n
FIN
FIN
//1er droite
//calculer con(x,z)
POUR i=1 A n
SI n<>0 ALORS
MCONXZ=MCONXZ+(VARXZ[i]/n)
FIN
FIN
CONXZ=MCONXZ-(Xbarre*Zbarre)
//calculer var(x)
POUR i=1 A n
SI n<>0 ALORS
MCONX=MCONX+(XCARRE[i]/n)
FIN
FIN
CONX=MCONX-Puissance(Xbarre,2)
//calculer A
GA=CONXZ/CONX
//calculer B
GB=Zbarre-(GA*Xbarre)
//2eme droite
//calculer la var(z)
POUR i=1 A n
SI n<>0 ALORS
MCONZ=MCONZ+(YCARRE[i]/n)
FIN

```

```

FIN
CONZ=MCONZ-Puissance(Zbarre,2)
//calculer A Prime
SI CONZ<>0 ALORS
GAP=CONXZ/CONZ
FIN
//calculer B Prime
GBP=Xbarre-(GAP*Zbarre)
//droite d'allométrie
//calculer sigma de x
sigX=Racine(CONX)
//calculer sigma de Z
sigZ=Racine(CONZ)
//calculer Petit a
SI sigX<>0 ALORS
PA=sigZ/sigX
FIN
//calculer le coefficient de corrélation
R=Racine(GA*GAP)
grCrée("Graphe",grNuage)
grDestinationChamp("Graphe","IMG_GRAPHE")
POUR i=1 A n
grNuageAjouteDonnéeXZ("Graphe",1,VARX[i],VARZ[i])
FIN
grNuageCouleurSérie("Graphe", 1,iNoir)
//pour i=1 à n
//grNuageAjouteDonnéeXZ("Graphe",2,VARX[i],GA*varx[i]+GB)
//fin
//pour i=1 à n
//grNuageAjouteDonnéeXZ("Graphe",3,VARX[i],varx[i]+GBP/GAP)
//fin
POUR i=1 A n
grNuageAjouteDonnéeXZ("Graphe",2,VARX[i],PA*(VARX[i]-Xbarre)+Zbarre)
FIN
grNuageCouleurSérie("Graphe",2,iRougeClair)
//Max X
POUR i=1 A n
    maxix1=VARX[i]
    SI maxix1>maxix ALORS
        maxix=maxix1
    FIN
FIN
//Min X
minix=maxix
POUR i=1 A n
    minix1=VARX[i]

```

```

    SI minix1<minix ALORS
    minix=minix1
    FIN
    FIN
//droite Max
POUR i=1 A n
maxi1=VARZ[i]
SI maxi1>Maxi ALORS
Maxi=maxi1
FIN
FIN
POUR i=1 A n
grNuageAjouteDonnéeXZ("Graphe",3,VARX[i],Maxi)
FIN
grNuageCouleurSérie("Graphe",3,RVB(255,0,255))
//droite Min
Mini=Maxi
POUR i=1 A n
Mini1=VARZ[i]
SI Mini1<Mini ALORS
Mini=Mini1
FIN
FIN
POUR i=1 A n
grNuageAjouteDonnéeXZ("Graphe",4,VARX[i],Mini)
FIN
grNuageCouleurSérie("Graphe",4,iVertClair)
//intervalle de tolérance
moy=(Maxi+Mini)/2
SI ITR<>0 ALORS
POUR i=1 A n
grNuageAjouteDonnéeXZ("Graphe",5,VARX[i],[moy+(ITR/2)])
//grNuageAjouteDonnéeXZ("Graphe",5,VARX[i], maxi-(itr/2))
FIN
grNuageCouleurSérie("Graphe",5,iBleuClair)
POUR i=1 A n
grNuageAjouteDonnéeXZ("Graphe",6,VARX[i],[moy-(ITR/2)])
//grNuageAjouteDonnéeXZ("Graphe",6,VARX[i],mini+(itr/2))
FIN
FIN
grNuageCouleurSérie("Graphe",6,RVB(128,64,0))
grLégende("Graphe",grADroite)
grNuageEtiquetteSérie("Graphe",1,"Nuage de Points")
grNuageEtiquetteSérie("Graphe",2,"Droite associée")
grNuageEtiquetteSérie("Graphe",3,"Valeur Max")
grNuageEtiquetteSérie("Graphe",4,"Valeur Mini")

```

```
grNuageEtiquetteSérie("Graphe",5,"Intervalle de Tolérance")
grNuageEtiquetteSérie("Graphe",6,"Interval de Tolérance")
grLissage("Graphe", Vrai)
grDessine("Graphe")
```

4.3. Planéité

Le palpé de la surface réelle du plan est montré par les relevés expérimentaux sur la [figure.4.2.](#) Le but de ce traitement consiste à chercher l'équation d'une fonction $Z = f(X,Y)$ qui s'ajuste le mieux aux informations connues, puis à extrapoler les résultats à l'ensemble de l'espace étudié. Les valeurs X et Y correspondent aux coordonnées des lieux et Z aux valeurs des lieux (X;Y). La fonction recherchée correspondante est de la forme

$$\mathbf{Z} = \mathbf{AX} + \mathbf{BY} + \mathbf{C} \quad (4.8)$$

où A, B et C sont des inconnues à déterminer. Cela correspond à l'équation d'un plan. Nous allons donc approcher les données X, Y et Z par un plan. Pour retrouver les valeurs de A, B et C, nous allons procéder à une régression linéaire multiple d'ordre 2

Pour calculer les coefficients A, B et C de l'équation du plan qui approche les données, nous allons effectuer une régression linéaire multiple d'ordre 2 qui correspond à une double régression linéaire classique. On va appliquer la méthode des moindres carrés aux deux variables X et Y. On obtiendra alors les valeurs de A, B et C ce qui nous permettra de connaître l'équation du plan qui approche les données. Ensuite, il reste à donner à chaque lieu Z la valeur du plan qui lui est associée.

Appelons Φ la fonction de paramètres A, B et C qui correspond à la somme des carrés des écarts :

$$\Phi = \sum (Z - AX - BY - C)^2 \quad (4.9)$$

Les dérivées partielles sont les suivantes:

$$\bullet \quad \frac{\partial \Phi}{\partial A} = -2 \sum X(Z - AX - BY - C) \Leftrightarrow \sum XZ = A \sum X^2 + B \sum XY + C \sum X \quad (4.10)$$

$$\bullet \quad \frac{\partial \Phi}{\partial B} = -2 \sum Y(Z - AX - BY - C) \Leftrightarrow \sum YZ = A \sum XY + B \sum Y^2 + C \sum Y \quad (4.11)$$

$$\bullet \quad \frac{\partial \Phi}{\partial C} = -2 \sum (Z - AX - BY - C) \Leftrightarrow \sum Z = A \sum X + B \sum Y + nC \quad (4.12)$$

avec n le nombre de valeurs

On obtient alors un système de 3 équations à 3 inconnues

$$\begin{aligned}\sum XZ &= A \sum X^2 + B \sum YX + C \sum X \\ \sum YZ &= A \sum YX + B \sum Y^2 + C \sum Y \\ \sum Z &= A \sum X + B \sum Y + n.C\end{aligned}\tag{4.13}$$

La forme matricielle est la suivante :

$$\begin{pmatrix} \sum X^2 & \sum YX & \sum X \\ \sum YX & \sum Y^2 & \sum Y \\ \sum X & \sum Y & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum XZ \\ \sum YZ \\ \sum Z \end{pmatrix}\tag{4.14}$$

La résolution du système précédent donne les résultats suivants:

$$A = \frac{(n \sum XZ - \sum X \sum Z)(n \sum Y^2 - (\sum Y)^2) - (n \sum YZ - \sum Y \sum Z)(n \sum YX - \sum Y \sum X)}{(n \sum X^2 - (\sum X)^2)(n \sum Y^2 - (\sum Y)^2) - (n \sum YX - \sum Y \sum X)^2}\tag{4.15}$$

$$B = \frac{(n \sum XZ - \sum X \sum Z)(n \sum YX - \sum Y \sum X) - (n \sum YZ - \sum Y \sum Z)(n \sum X^2 - (\sum X)^2)}{(n \sum YX - \sum Y \sum X)^2 - (n \sum X^2 - (\sum X)^2)(n \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}\tag{4.16}$$

On en déduit la valeur de C à partir de A et B:

$$C = \frac{1}{n} (\sum Z - A \sum X - B \sum Y)\tag{4.17}$$

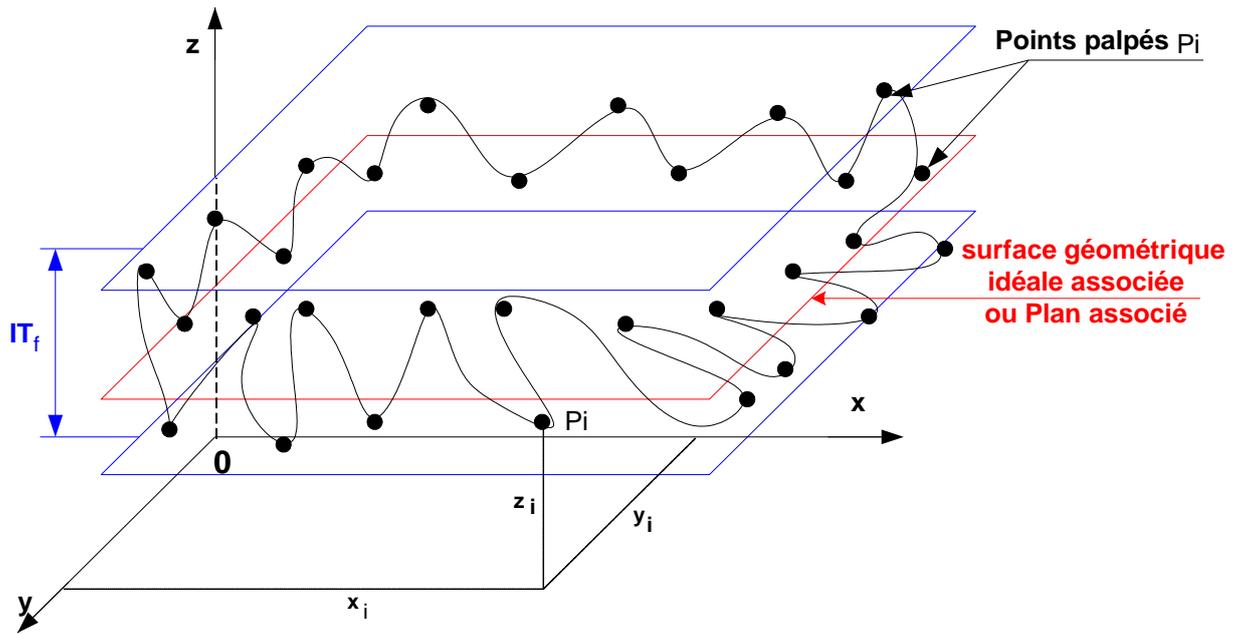


Fig.4.2. Plan associé de la planéité

4.3.1. La structure du programme de calcul des paramètres est comme suite :

```
n=TableOccurrence("TABLE1")
```

```
//calcul de XY[i]
FOR i=1 to n
VARXY[i]=VARX[i]*VARY[i]
END
```

```
// Calcul de la Somme des XY[i]
FOR i=1 to n
VARXY1=VARXY1+VARX[i]*VARY[i]
END
```

```
//calcul de X carré
FOR i=1 A n
XCARRE[i]=Puissance(VARX[i],2)
END
```

```
//calcul de y carré
FOR i=1 A n
YCARRE[i]=Puissance(VARY[i],2)
END
```

```
//calcul de la somme de X
FOR i=1 A n
Xbarre=Xbarre+VARX[i]
END
```

```
//calcul de la somme de Y Carré
FOR i=1 A n
Ybarre1=Ybarre1+YCARRE[i]
END
```

```
//calcul de la somme de x Carré
FOR i=1 A n
Ybarre=Ybarre+XCARRE[i]
END
```

```
//calcul de la somme de Z
FOR i=1 A N
Zbarre=Zbarre+VARZ[i]
END
```

```
//calcul de la somme de Y
FOR i=1 A n
MCONXY=MCONXY+VARY[i]
END
```

```
//calcul de la somme de X carré + Y carré
FOR i=1 A n
CONXY=CONXY+(XCARRE[i]+YCARRE[i])
END
```

```
//calculer somme XiYi
FOR i=1 A n
XY=XY+(VARY[i]*VARX[i])
END
```

```
//calculer somme XiZi
FOR i=1 A n
XZ=XZ+(VARX[i]*VARZ[i])
END
```

```
//calculer somme YiZi
FOR i=1 A n
YZ=YZ+(VARY[i]*VARZ[i])
END
```

```
//Calculer GA
POUR i=1 A n
GAE=((n*XZ)-(Xbarre*Zbarre)*(n*Ybarre1)-(Puissance(MCONXY,2)))-((n*YZ)-
(MCONXY*Zbarre)*(n*XY)-(MCONXY*Xbarre))
GAD=(((n*Ybarre)-Puissance(Xbarre,2))*((n*Ybarre1)-(Puissance(MCONXY,2))))-
(Puissance(n*XY-(Xbarre*MCONXY),2))
FIN
```

```

IF GAD <> 0 THEN
GA=GAE/GAD
END

```

```

//Calculer GB
GBE=((n*XZ)-(Xbarre*Zbarre)*(n*XY)-(MCONXY*Xbarre))-((n*YZ)-
(MCONXY*Zbarre)*(((n*Ybarre)-(Puissance(Xbarre,2))))))
GBD=(Puissance(n*XY-(Xbarre*MCONXY),2))-((n*Ybarre-
(Puissance(Xbarre,2)))*((n*Ybarre1)-(Puissance(MCONXY,2))))

```

```

IF GBD <> 0 THEN
GB=GBE/GBD
END

```

```

//Calculer GC
IF n <> 0 THEN
GC=(1/n)*(Zbarre-(GA*Xbarre)-(GB*MCONXY))
END

```

```

// dresser le graphe

```

```

grCrée("Graphe",grNuage)
grDestinationChamp("Graphe","IMG_GRAPHE")
grNuageReliePoint("Graphe",Vrai)

```

```

// Représentation du graphe
FOR i=1 A n
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",1,VARX[i],VARY[i])
END
//droite Max
POUR i=1 A n
    maxi1=VARY[i]
    SI maxi1>Maxi ALORS
        Maxi=maxi1
    FIN
FIN
POUR i=1 A n
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",3,VARX[i],Maxi)
FIN

```

```

//droite Min
Mini=Maxi
FOR i=1 A n
Mini1=VARY[i]
IF Mini1<Mini THEN
Mini=Mini1
END
END

```

```

FOR i=1 A n

```

```

grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",4,VARX[i],Mini)
END

//intervalle de tolérance
FOR i=1 A n
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",5,VARX[i],Maxi-(ITR/2))
END

FOR i=1 A n
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",6,VARX[i],Mini+(ITR/2))
END
grDessine("Graphe")

FOR i=1 A n
IF Maxi-(ITR/2)>((-GA*VARX[n])-GC)/GB AND Mini+(ITR/2)<((-GA*VARX[1])-GC)/GB
THEN
    Libellé1..Visible=TRUE
    Libellé2..Visible=FALSE
ELSE
    Libellé1..Visible=FALSE
    Libellé2..Visible=TRUE
END
END

```

4.4. Circularité

En ce qui concerne la forme circulaire elle est définie dans un repère cartésien par une équation de la forme :

$$(\mathbf{x} - \mathbf{a})^2 + (\mathbf{y} - \mathbf{b})^2 = \mathbf{r}^2 \quad (4.18)$$

où \mathbf{r} représente le rayon du cercle.

On calcule le rayon optimal du cercle \mathbf{r}_{opt} illustré par la figure 4.3 telle que la différence par rapport à chaque rayon relevé par la mesure \mathbf{r}_i soit minimale.

$$b = \frac{b_1 - b_2}{2 \left[n \sum_{i=1}^n y^2 - \left[\sum_{i=1}^n y \right]^2 \right] - 2 \left[n \sum_{i=1}^n xy - \sum_{i=1}^n x \sum_{i=1}^n y \right]} \quad (4.19)$$

$$b_1 = \left[\sum_{i=1}^n x^2 - \left(\sum_{i=1}^n x \right)^2 \right] \cdot \left[n \sum_{i=1}^n y (x^2 + y^2) - \sum_{i=1}^n y \sum_{i=1}^n (x^2 + y^2) \right]$$

$$b_2 = \left[\sum_{i=1}^n xy - \sum_{i=1}^n x \sum_{i=1}^n y \right] \cdot \left[n \sum_{i=1}^n y (x^2 + y^2) - \sum_{i=1}^n y \sum_{i=1}^n (x^2 + y^2) \right]$$

$$a = \frac{\left[n \sum_{i=1}^n xy - \sum_{i=1}^n x \sum_{i=1}^n (x^2 + y^2) \right] - 2b \left[n \sum_{i=1}^n xy - \sum_{i=1}^n x \sum_{i=1}^n y \right]}{2 \left[n \sum_{i=1}^n y^2 - \left[\sum_{i=1}^n y \right]^2 \right] - 2 \left[n \sum_{i=1}^n xy - \sum_{i=1}^n x \sum_{i=1}^n y \right]^2} \quad (4.20)$$

Tel que **a** et **b** sont les coordonnées du centre du cercle et **n** le nombre de points.

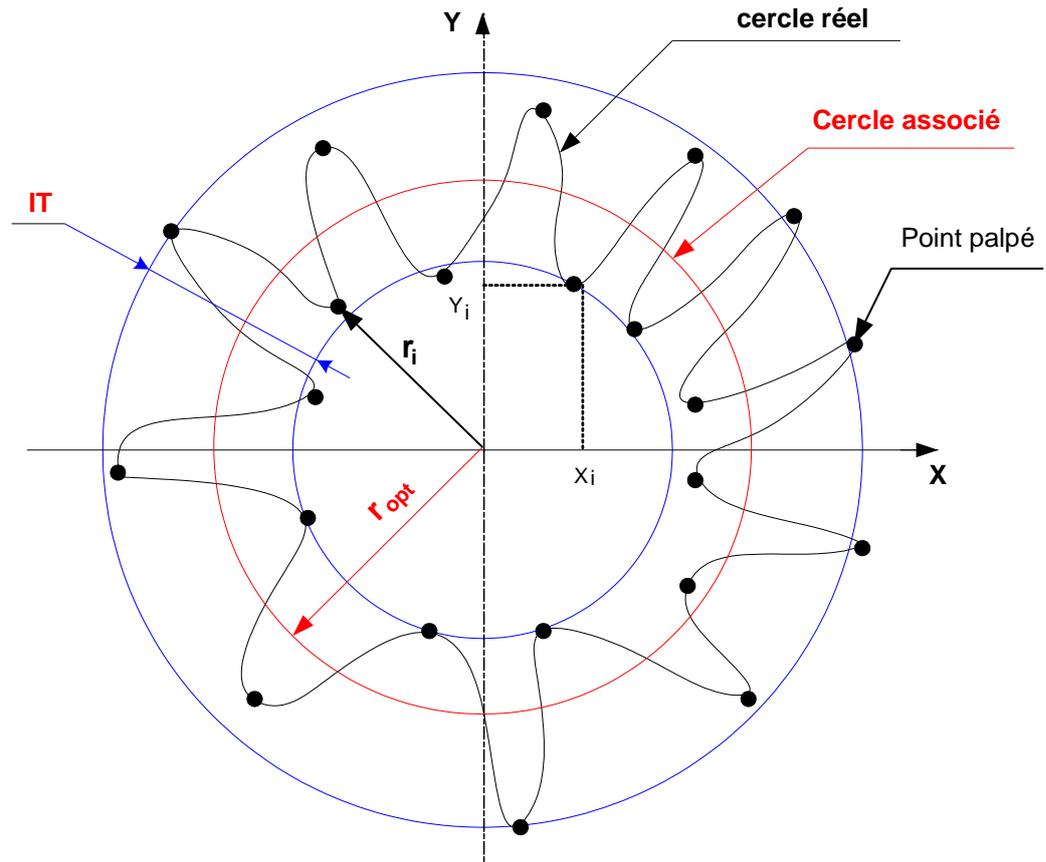


Fig 4.3. Cercle associé de la circularité.

Le rayon optimal :

$$r_i = \sqrt{(x_i - a)^2 + (y_i)^2} \quad (4.21)$$

$$r_{opt} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n} \quad (4.22)$$

4.4.1. La structure du programme de calcul des paramètres est comme suite :

```

n=TableOccurrence("TABLE1")
//calcul de XY[i]
POUR i=1 A n
VARXY[i]=VARX[i]*VARY[i]
FIN

POUR i=1 A n
VARXY1=VARXY1+VARX[i]*VARY[i]
FIN
//calcul de X carré
POUR i=1 A n
XCARRE[i]=Puissance(VARX[i],2)
FIN
//calcul de X carré
POUR i=1 A n
YCARRE[i]=Puissance(VARY[i],2)
FIN
//calcul de X barre
POUR i=1 A n
Xbarre=Xbarre+VARX[i]
FIN
//calcul de Y barre
POUR i=1 A n
Ybarre1=Ybarre1+YCARRE[i]
FIN
//calcul de Y barre
POUR i=1 A n
Ybarre=Ybarre+XCARRE[i]
FIN
//1er droite
//calculer con(x,y)
POUR i=1 A n
MCONXY=MCONXY+VARY[i]
FIN
POUR i=1 A n
CONXY=CONXY+(XCARRE[i]+YCARRE[i])
FIN
//calculer PB1
POUR i=1 A n
PB11=PB11+(n*VARY[i]*(XCARRE[i]+YCARRE[i]))
FIN
POUR i=1 A n
PB12=PB12+(n*VARX[i]*(XCARRE[i]+YCARRE[i]))
FIN
POUR i=1 A n
PB1=(Ybarre-Xbarre)*(PB11-(MCONXY*CONXY))
FIN
//CALCULE DE PB2

```

```

FOR i=1 A n
    PB2=(n*VARXY1-Xbarre*MCONXY)*(PB12-(Xbarre*CONXY))
FIN
//CALCULER GB
SI (2*(n*Ybarre1-Puissance(MCONXY,2))-(2*(n*VARXY1-Xbarre*MCONXY))) <> 0 ALORS
GB=(PB1-PB2)/(2*(n*Ybarre1-Puissance(MCONXY,2))-(2*(n*VARXY1-Xbarre*MCONXY)))
FIN
//calculer GA
GA1=(n*VARXY1-Xbarre*CONXY)-(2*GB*(n*VARXY1-Xbarre*MCONXY))
GA2=(2*(n*Ybarre1-Puissance(MCONXY,2))-(2*(Puissance(n*VARXY1-
Xbarre*MCONXY,2))))
SI GA2<>0 ALORS
GA=GA1/GA2
FIN
//CALCULE Ri
FOR i= 1 A n
RYON[i]=Racine(Puissance((VARX[i]-GA),2)+Puissance((VARY[i],2))
END
//CALCULER R optimale
FOR i= 1 A n
SI n<>0 ALORS
Ropt=Ropt+(RYON[i]/n)
FIN
END
grCrée("Graphe",grNuage)
grDestinationChamp("Graphe","IMG_GRAPHE")
grNuageReliePoint("Graphe",Vrai)
POUR i=1 A TableOccurrence("TABLE1")
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",1,VARX[i],VARY[i])
FIN
grNuageCouleurSérie("Graphe", 1,iNoir)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",2,0,Ropt)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",2,Sin(40)*Ropt,Sin(40)*Ropt)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",2,Ropt,0)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",2,Sin(40)*Ropt,-Sin(40)*Ropt)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",2,0,-Ropt)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",2,-Sin(40)*Ropt,-Sin(40)*Ropt)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",2,-Ropt,0)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",2,-Sin(40)*Ropt,Sin(40)*Ropt)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",2,0,Ropt)
grNuageCouleurSérie("Graphe",2,iRougeClair)
//cercle Max
POUR i=1 A n
    maxi1=RYON[i]
    SI maxi1>Maxi ALORS
        Maxi=maxi1
    FIN
FIN
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",3,0,Maxi)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",3,Sin(40)*Maxi,Sin(40)*Maxi)

```

```

grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",3,Maxi,0)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",3,Sin(40)*Maxi,-Sin(40)*Maxi)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",3,0,-Maxi)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",3,-Sin(40)*Maxi,-Sin(40)*Maxi)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",3,-Maxi,0)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",3,-Sin(40)*Maxi,Sin(40)*Maxi)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",3,0,Maxi)
grNuageCouleurSérie("Graphe",3,RVB(255,0,255))
//cercle Min
Mini=Maxi
POUR i=1 A n
    Mini1=RYON[i]
    SI Mini1<Mini ALORS
        Mini=Mini1
    FIN
FIN
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",4,0,Mini)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",4,Sin(40)*Mini,Sin(40)*Mini)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",4,Mini,0)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",4,Sin(40)*Mini,-Sin(40)*Mini)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",4,0,-Mini)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",4,-Sin(40)*Mini,-Sin(40)*Mini)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",4,-Mini,0)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",4,-Sin(40)*Mini,Sin(40)*Mini)
grNuageAjouteDonnéeXY("Graphe",4,0,Mini)
grNuageCouleurSérie("Graphe",4,iVertClair)

grLégende("Graphe",grADroite)
grNuageEtiquetteSérie("Graphe",1,"Nuage des Points")
grNuageEtiquetteSérie("Graphe",2,"Rayon Optimal")
grNuageEtiquetteSérie("Graphe",3,"Rayon Max")
grNuageEtiquetteSérie("Graphe",4,"Rayon Min")
grNuageEtiquetteSérie("Graphe",5,"Intervalle de Tolérance")
grNuageEtiquetteSérie("Graphe",6,"Intervalle de Tolérance")
grLissage("Graphe", Vrai)
grDessine("Graphe")

```

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre ; nous avons calculé les paramètres des équations des trois éléments géométriques qui sont : la droite, le plan et le cercle.

La détermination des équations des trois éléments géométriques idéaux associés est faite par le critère des moindres carrés.

Des programmes ont été développés pour les trois éléments géométriques associés. Ils sont intégrés dans la conception du programme informatique proposée au chapitre V pour la vérification des spécifications géométriques de forme de ces trois éléments géométriques.

CHAPITRE 5

Conception du programme informatique CAO

5.1. Introduction

Pour pallier aux problèmes de l'acceptation ou du rejet des pièces mécaniques posés par les contrôles des spécifications de forme dans notre atelier de génie mécanique à l'Université Aboubekr Belkaïd Tlemcen, dans les ateliers de mécanique des Technicums de Besseghier Lakhdar et Ibn-Saâd, le lycée Commandant Farradj aussi dans les centres de formation professionnelle et entreprises qui manquent à l'implantation dans leurs laboratoires de contrôle de la machine à mesurer tridimensionnelle car c'est un matériel spécialisé et coûteux, pour cela nous optons à la conception d'un programme informatique CAO pour la vérification de ces spécifications de forme. Le programme a été développé en utilisant le langage « windev » de la cinquième génération (L5G) [WD9].

On expose deux exemples pour la vérification de la rectitude, un exemple pour la planéité et un exemple pour la circularité.

5.2. Démarche métrologique du contrôle et de la vérification

La figure.5.1 illustre la démarche métrologique du contrôle et de la vérification des spécifications de forme des pièces mécaniques par la méthode traditionnelle qui consiste à :

- chercher l'élément géométrique idéal nominal
- palper le nuage de points
- relever des écarts de mesure des points palpés et calcul du défaut de forme nominal
- chargement des coordonnées x_i , y_i et écarts de mesure dans le programme informatique
- imposition de l'intervalle de tolérance (IT_f)
- modélisation de l'élément géométrique idéal associé par le critère des moindres carrés
- résultats :

Si l'élément associé se trouve à l'intérieur de la zone de tolérance imposée :

- la pièce est conforme à la spécification de forme (pièce acceptée)

Si un point aberrant (ou plusieurs) de l'élément associé se trouve en dehors de la zone de tolérance imposée :

- la pièce n'est pas conforme à la spécification de forme (pièce rejetée).

Une comparaison des résultats est faite entre cette méthode et la méthode conventionnelle de contrôle par machine à mesurer tridimensionnelle pour validation de nos résultats.

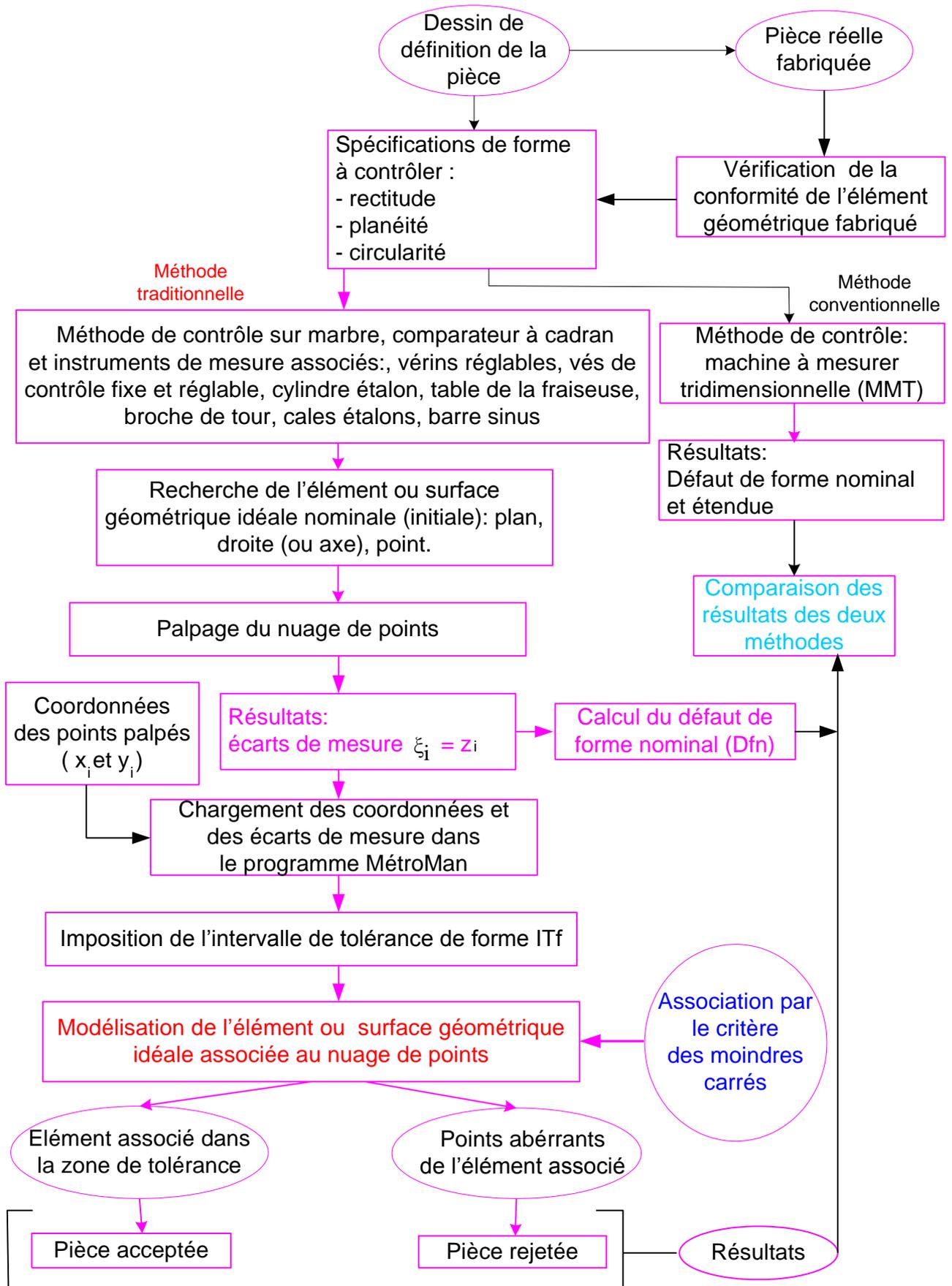


Fig.5.1.Démarche métrologique

5.3. Organigramme général

Une bonne définition des modules de programme et de leur interaction est l'une des plus importantes phases de la conception. La figure.5.2 illustre, en général, l'architecture fonctionnelle de notre programme . Cette figure représente toutes les étapes de la conception et l'implémentation.

Cette partie, décrit les étapes successives dans notre organigramme de programmation :

- 1.Choix de la forme de l'élément à contrôler (rectitude, planéité et circularité) .
- 2.Type de téléchargement des mesures effectuées :
 - Chargement manuel (Ouverture d'un fichier, création).
- 3.Précision de l'intervalle de tolérance admis par le concepteur de la pièce mécanique.
- 4.Transmission des paramètres.
- 5.Visualisation graphique : représentation de la direction générale de l'élément géométrique.

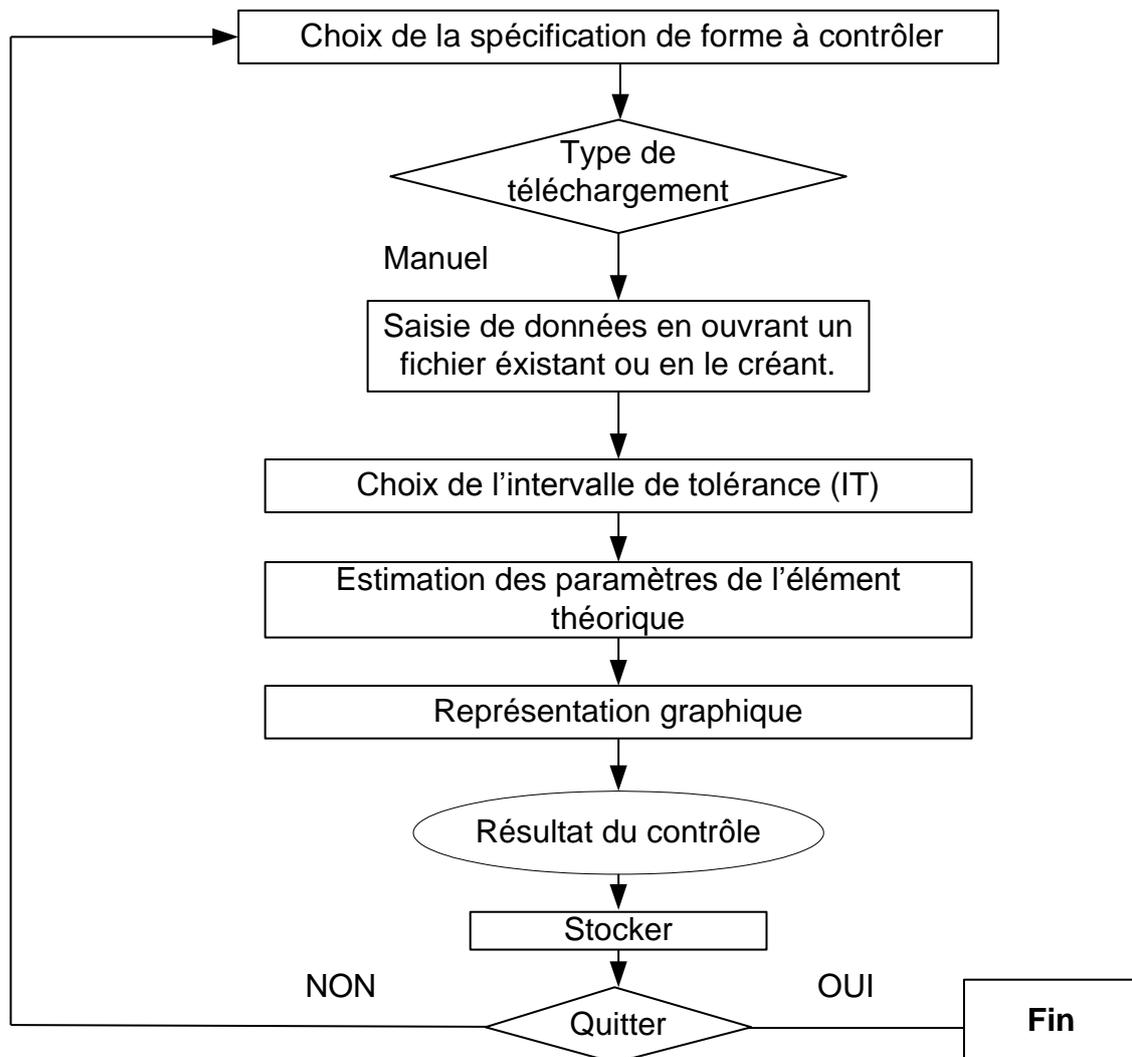


Fig.5.2.Organigramme général pour la vérification des éléments

5.4. Conception du programme CAO pour vérification des spécifications

La Structure externe de l'interface du programme réalise l'interactivité entre l'utilisateur et le programme. Elle est composée de barres et de boîtes de dialogue. Comme toute application, notre programme comporte une page d'accueil (palette), illustrée par l'écran de la figure.5.3 qui contient un ensemble de boutons et la barre de menu.



Fig.5.3. Page d'accueil (palette)

Ce programme est baptisé "MétroMan" sera présenté dans les sections qui suivent.

5.4.1. Fonctionnalités des différents boutons

5.4.1.1. Rectitude

Le bouton **Rectitude** désigne le chemin vers le contrôle de la rectitude d'une arête ou d'une ligne d'une surface. Cet accès se fait par un simple clic du bouton gauche de la souris sur le bouton désigné de la palette.

5.4.1.2. Planéité

Le bouton **Planéité** désigne le chemin vers le contrôle de la forme des surfaces planes. Cet accès se fait par simple clic du bouton gauche de la souris sur le bouton désigné de la palette.

5.4.1.3. Circularité

Le bouton **Circularité** désigne le chemin vers le contrôle de la forme circulaire d'une surface de révolution. Cet accès se fait par un simple clic du bouton gauche de la souris sur le bouton désigné de la palette.

5.4.1.4. Aide

Notre logiciel dispose d'une aide en ligne pratique et rapide pour obtenir des renseignements concernant soit la tâche à exécuter, soit une caractéristique ou une boîte de dialogue sur la quelle on désire en savoir plus.

La rubrique d'aide illustrée par la figure.5.4 est disponible chaque fois qu'une commande s'affiche dans une boîte de dialogue.

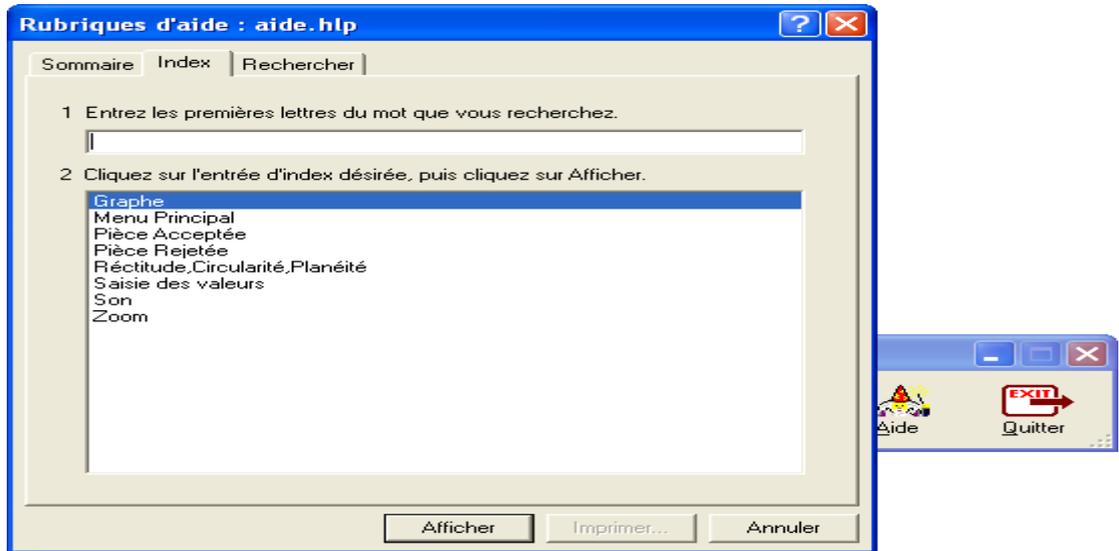


Fig.5.4. Rubriques d'aide

5.4.1.5. Quitter

Il se fait par un simple clic du bouton gauche de la souris sur quitter.

5.4.2. Interface du programme

Après avoir choisi la forme à contrôler en cliquant sur l'un des boutons de la palette, une boîte de dialogue apparaît par exemple celle du bouton de la rectitude illustrée par la figure.5.5.

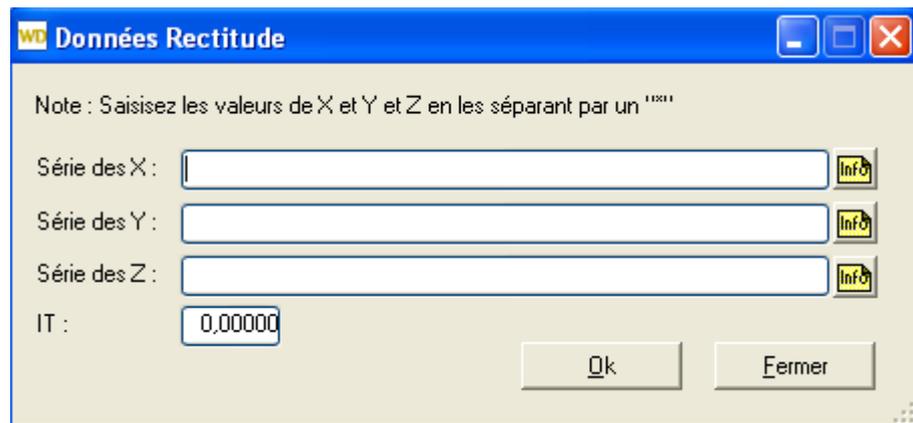


Fig.5.5. Fenêtre de saisie des coordonnées des points palpés

Cette dernière est composée de :

- Trois champs dont l'utilisateur doit charger ses coordonnées x, y et z
- Un champ pour mentionner l'intervalle de tolérance IT

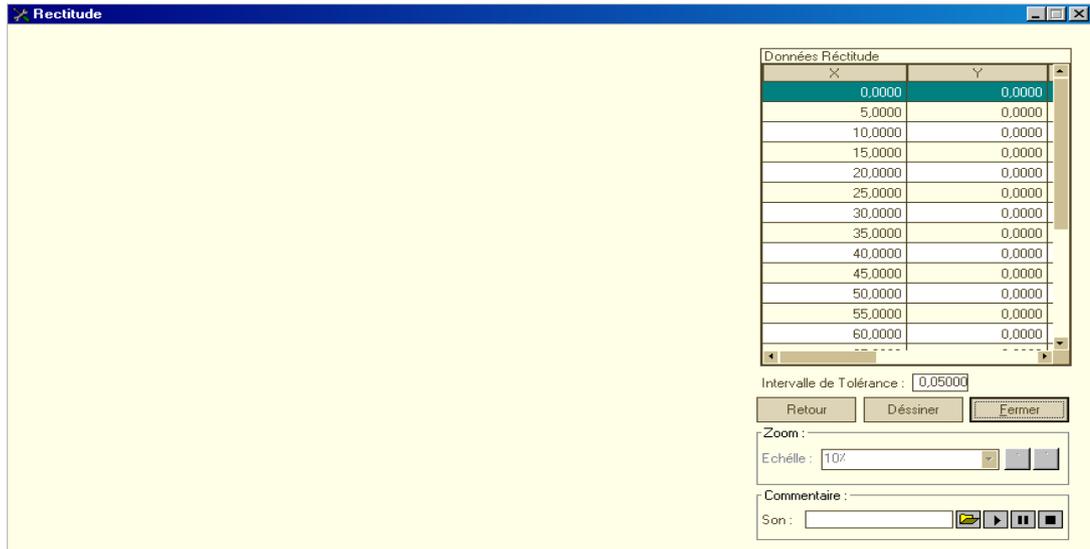


Fig.5.8. Coordonnées et intervalle de tolérance de la pièce semelle

Dans cette boîte se fait le traitement des données puis la transmission des paramètres de l'équation de l'élément géométrique associé par un simple clic du bouton gauche de la souris sur "Dessiner" pour validation.

La représentation du graphe de l'élément géométrique associé et son équation $Z = f(x)$ apparaissent sur cette fenêtre de la figure.5.9.

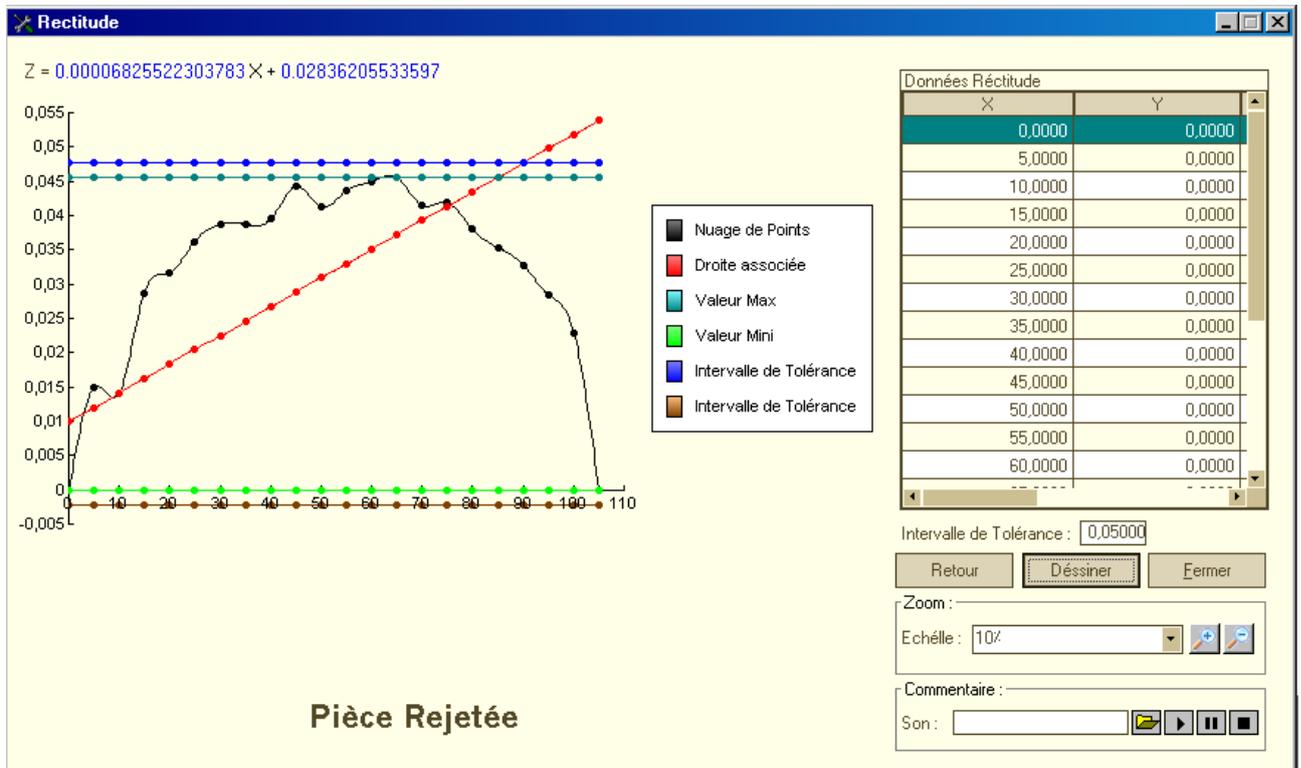


Fig.5.9. Élément géométrique associé et son équation (rectitude)

5.5.1.1. Interprétation du graphe

- un axe des X sur lequel sont portées les abscisses x_i des points palpés de 0 à 105mm. Cet axe représente l'élément géométrique nominal
- un axe des Z sur lequel sont portées les ordonnées z_i des points palpés qui sont les écarts de mesure ζ_i
- les points palpés par le comparateur à cadran sont représentés par des points ronds de couleur (noire), ils sont reliés par une ligne brisée de couleur (noire)
- la valeur maximale de l'écart de mesure égale à 0.0456mm est représentée par la droite de couleur (turquoise) parallèle à l'axe des X.
- la valeur minimale de l'écart de mesure égale à 0.000mm est représentée par la droite de couleur (verte) parallèle à l'axe des X
- le défaut de forme nominal (Df_n) est compris entre les deux droites de couleurs (turquoise et verte)
- l'intervalle de tolérance (ou zone de tolérance =0.05) est limité par les deux droites de couleurs (bleue et marron)
- la modélisation de la ligne réelle (ou génératrice) de la surface de la pièce est représentée par la droite associée de couleur (rouge) qui montre la direction générale de la rectitude par rapport à l'élément (ou droite) géométrique idéal nominal.

La pièce est rejetée par la programme informatique car la droite géométrique associée possède trois points aberrants qui se trouvent en dehors de la zone de tolérance.

5.5.1.2. Comparaison des résultats et validation

les résultats obtenus par la machine à mesurer tridimensionnelle de la pièce appelée "semelle" au chapitre 3 du tableau.24 sont les suivants :

le défaut de forme nominal est égal à 0.0625mm et le défaut de rectitude est égal à 0.0485mm.

On remarque que le défaut de forme nominal obtenu par la MMT est supérieur à celle de la zone de tolérance imposée. On remarque également que la valeur approximative du défaut de rectitude (ou étendue) de 0.0485 est très proche de l'intervalle de tolérance de 0.05.

Une spécification ne pourra donc être déclarée satisfaite que si la valeur trouvée est inférieure à la tolérance imposée suivant la norme NF E 02-204 (déclaration de conformité).

Le résultat de ce programme informatique est validé et donne donc une pièce hors tolérance d'où elle n'est pas conforme.

5.5.1.3. La rectitude de la pièce "semelle" est acceptée (si $IT_f > 0.0625$)

Prenons un intervalle de tolérance par exemple $IT = 0.065\text{mm}$; la programmation indique sur la fenêtre de la figure.5.10 que cette pièce est acceptée.

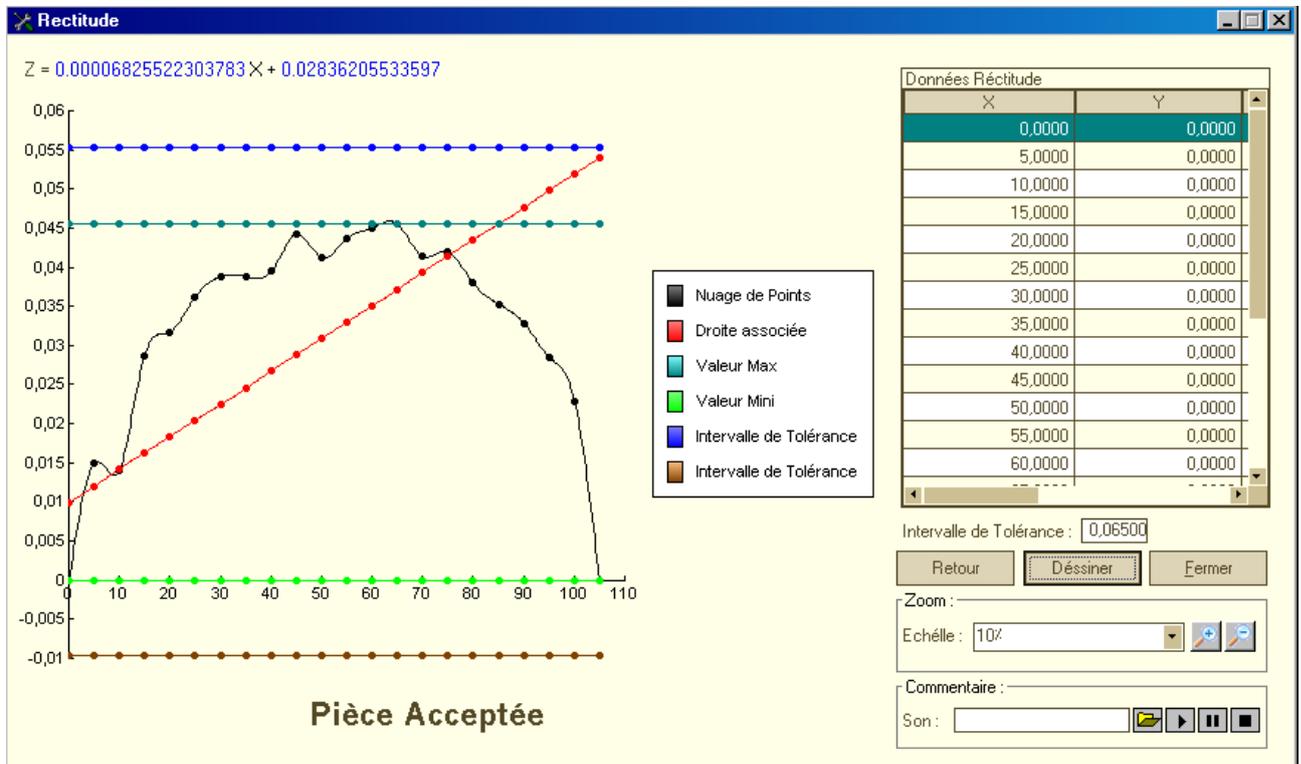


Fig.5.10. Pièce acceptée avec $IT = 0.065$ (rectitude)

La spécification de forme de cette pièce est alors acceptée car la droite géométrique associée se trouve à l'intérieur de la zone de tolérance.

5.5.2. Vérification de la rectitude de la pièce « glissière »

Après le remplissage des champs de la boîte de saisie figure.5.5 par les coordonnées (x_i et $y_i=0$) des points palpés du contrôle traditionnel du tableau.3.5, des écarts de mesure (z_i) du tableau.3.7 et l'intervalle de tolérance imposé de 0.015mm . L'utilisateur clique du bouton gauche de la souris sur "ok" pour transmettre ces données dans la nouvelle fenêtre illustrée par la figure .5.11 puis sur cette dernière d'un autre clic du bouton gauche de la souris sur "Dessiner" pour validation.

La représentation du graphe de l'élément géométrique associé et son équation $Z = f(x)$ apparaissent sur cette fenêtre.

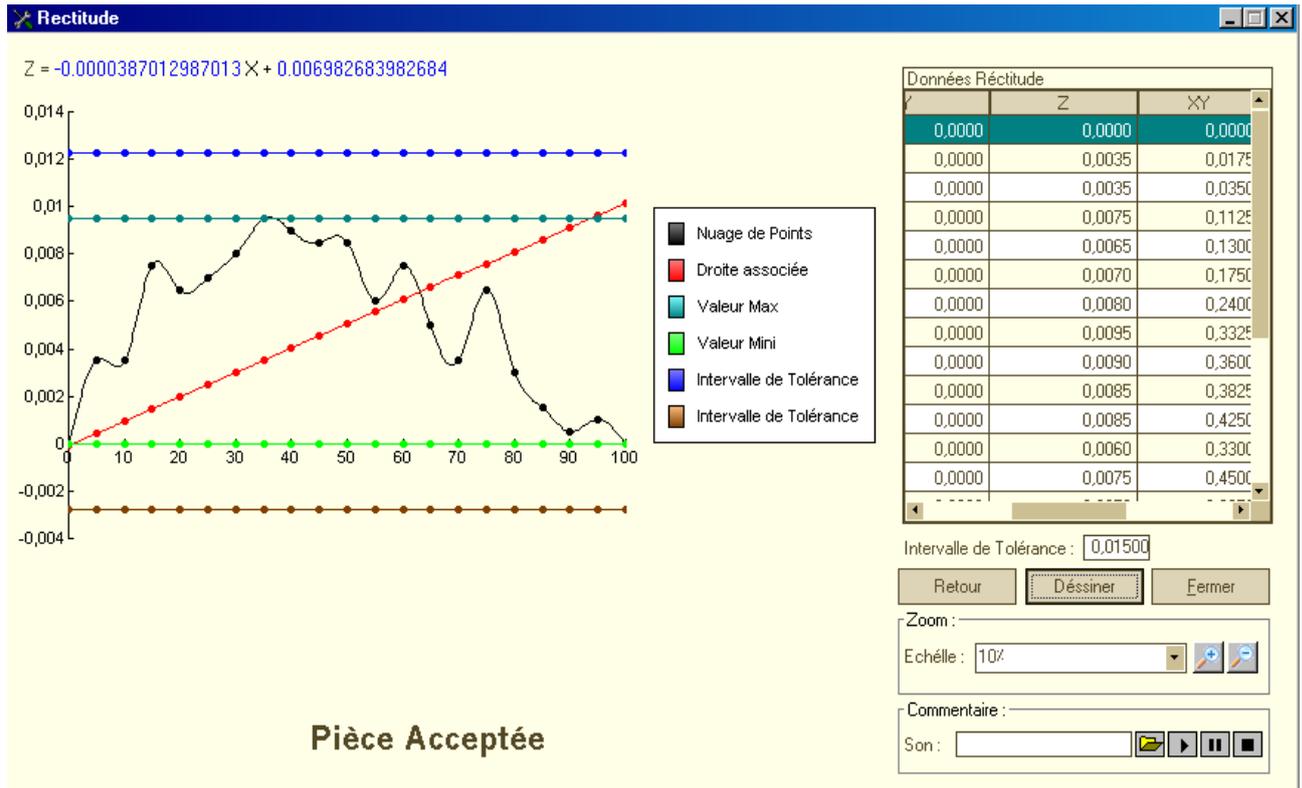


Fig.5.11. Pièce acceptée avec IT =0.015 mm (rectitude)

5.5.2.1. interprétation du graphe

- un axe des X sur lequel sont portées les abscisses x_i des points palpés de 0 à 100mm. Cet axe représente l'élément géométrique nominal
- un axe des Z sur lequel sont portées les ordonnées z_i des points palpés qui sont les écarts de mesure ζ_i
- les points palpés par le comparateur à cadran sont représentés par des points ronds de couleur (noire), ils sont reliés par une ligne brisée de couleur (noire)
- la valeur maximale de l'écart de mesure égale à 0.0095mm est représentée par la droite de couleur (turquoise) parallèle à l'axe des X
- la valeur minimale de l'écart de mesure égale à 0.000mm est représentée par la droite de couleur (verte) parallèle à l'axe des X
- le défaut de forme nominal (Df_n) est compris entre les deux droites de couleurs (turquoise et verte)
- l'intervalle de tolérance (ou zone de tolérance = 0.015 mm) est limité par les deux droites de couleurs (bleue et marron)

- la modélisation de la ligne réelle (ou génératrice) de la surface de la pièce est représentée par la droite associée de couleur (rouge) qui montre la direction générale de la rectitude par rapport à l'élément (ou droite) géométrique idéal nominal.

La spécification de forme de cette pièce est alors acceptée par le programme informatique car la droite géométrique associée se trouve à l'intérieur de la zone de tolérance.

5.5.2.2. Comparaison des résultats et validation

Les résultats obtenus par la machine à mesurer tridimensionnelle de la pièce appelée "glissière" au chapitre 3 du tableau.24 sont les suivants :

Le défaut de forme nominal est égal à 0.0095mm et le défaut de rectitude est égal à 0.0112mm.

On remarque que le défaut de forme et le défaut de rectitude obtenus par la MMT sont inférieurs à la zone de tolérance imposée 0.015mm. Le résultat de ce programme informatique est validé et satisfaisant d'où la pièce est conforme.

5.5.2.3. . Pièce rejetée avec IT = 0.0108 mm

Le graphe illustré par la figure.5.12 montre le rejet de la pièce car la surface géométrique idéale associée n'est pas comprise totalement dans la zone de tolérance.

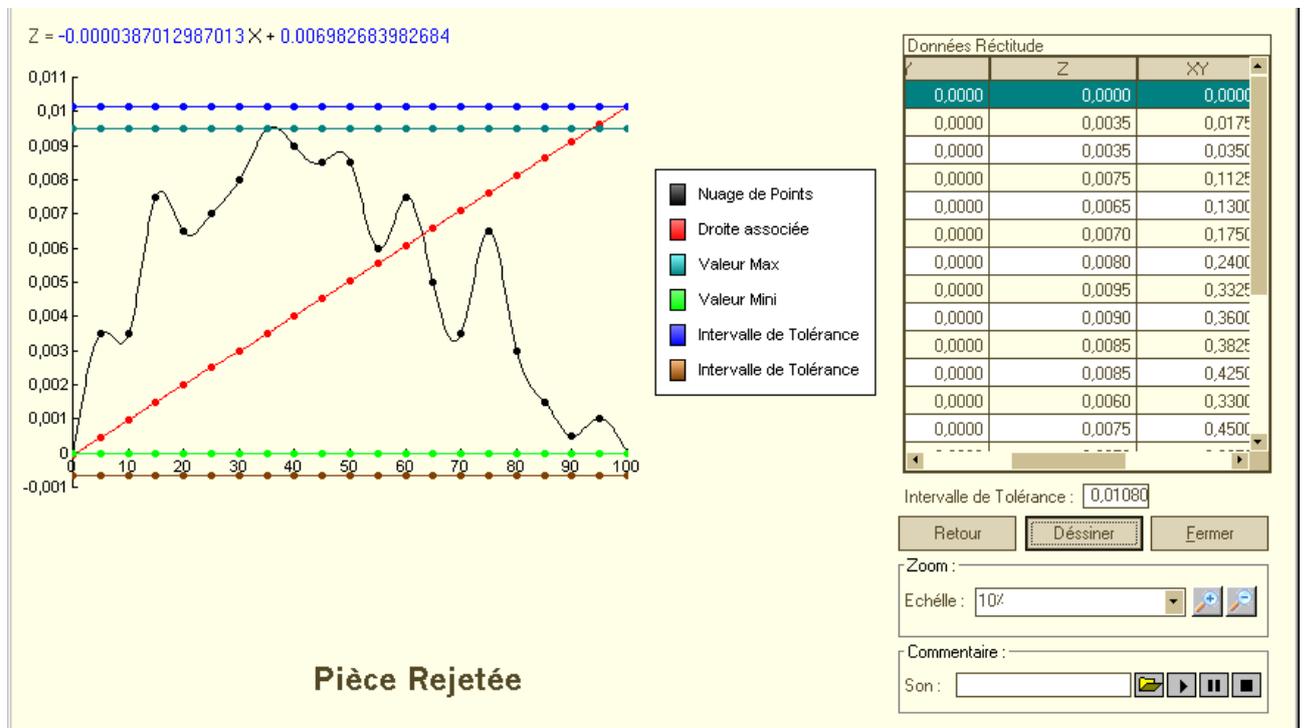


Fig.5.12. Pièce rejetée avec IT = 0.0108 mm (rectitude)

On remarque que la valeur approximative de 0.0108 mm trouvée par le programme informatique est le défaut de rectitude (ou étendue). La différence des défauts de rectitude entre les deux méthodes est : $0.0112 - 0.0108 = 0.0004$ mm ; c'est une valeur très petite et approximative.

5.6. Exemple de vérification de la planéité par le programme informatique

5.6.1. vérification de la planéité de la pièce « palier moteur »

Après le remplissage des champs de la boîte de saisie de la figure.5.5 par les coordonnées (x_i , y_i) des points palpés du contrôle traditionnel du tableau.3.10, des écarts de mesure (z_i) du tableau.3.12 et l'intervalle de tolérance imposé de 0.02mm. L'utilisateur clique du bouton gauche de la souris sur " ok " pour transmettre ces données dans la nouvelle fenêtre illustrée par la figure .5.13 puis sur cette dernière d'un autre clic du bouton gauche de la souris sur "Dessiner" pour validation. La représentation du graphe de l'élément géométrique associé et son équation $Z = f(x)$ apparaissent sur cette fenêtre. Cette représentation est en 2D. Les coordonnées des points palpés sont projetées sur le plan XZ. Les plans sont représentés par des droites.

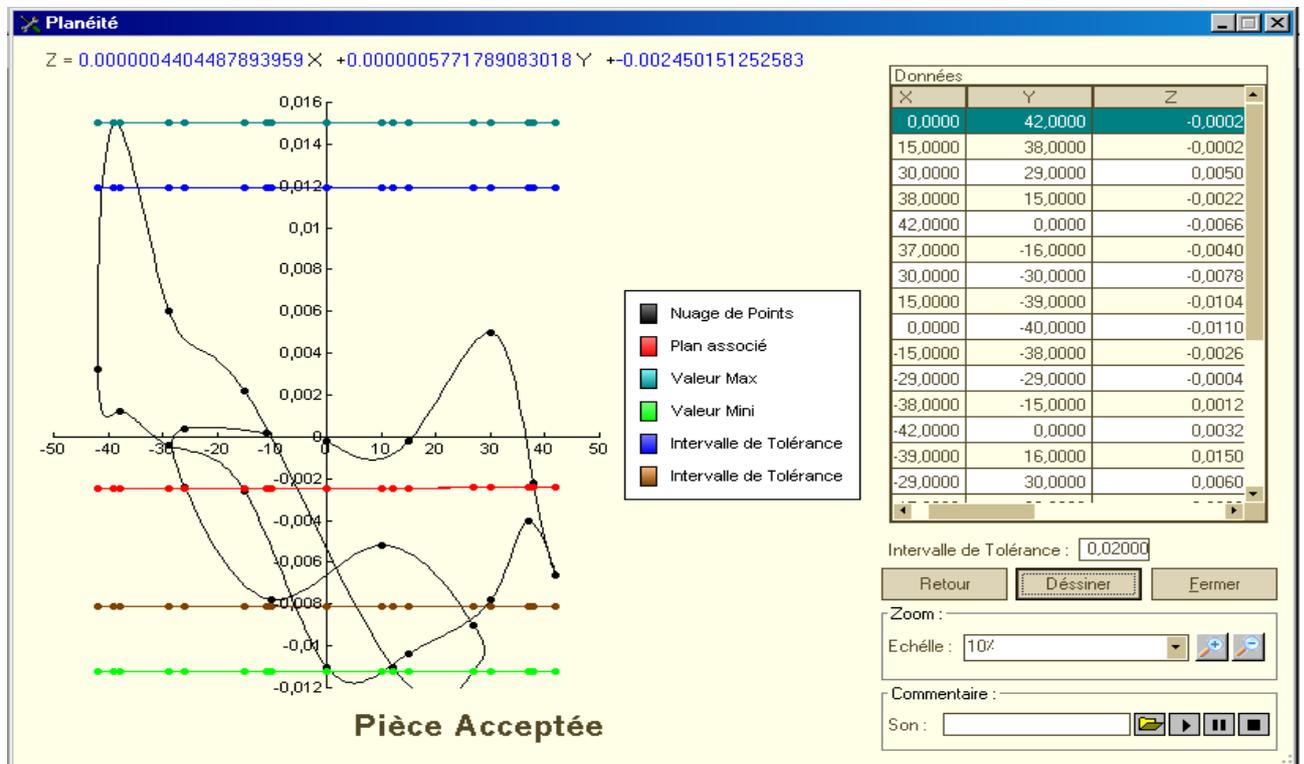


Fig.5.13. pièce acceptée avec IT =0.02mm (planéité)

5.6.1.1. Interprétation du graphe

- un axe des X sur lequel sont portées les abscisses x_i des points palpés. Cet axe
- un axe des Z sur lequel sont portées les ordonnées z_i des points palpés qui sont les écarts de mesure ζ_i
- un axe des Y non représenté sur lequel sont portées leurs valeurs
- le plan XY représente la surface géométrique idéale nominale
- les points palpés par le comparateur à cadran sont représentés par des points ronds de couleur (noire), ils sont reliés par une ligne brisée de couleur (noire)
- la valeur maximale de l'écart de mesure égale à 0.015mm est représentée par le plan de couleur (turquoise) parallèle à la surface géométrique nominale
- la valeur minimale de l'écart de mesure égale à -0.011mm est représentée par le plan de couleur (verte) parallèle à la surface géométrique nominale
- le défaut de forme nominal (Df_n) est compris entre les deux plans de couleurs (turquoise et verte)
- l'intervalle de tolérance (ou zone de tolérance =0.02) est limité par les deux plans de couleurs (bleue et marron). La valeur de +0.012 représente l'écart supérieur, la valeur de -0.008 représente l'écart inférieur
- la modélisation de la surface réelle de la pièce est représentée par la surface associée de couleur (rouge) qui montre la direction générale de la planéité par rapport à surface géométrique idéale nominale.

La spécification de forme de cette pièce est alors acceptée par le programme informatique car la surface géométrique idéale associée se trouve à l'intérieur de sa zone de tolérance.

5.6.1.2. Comparaison des résultats et validation

les résultats obtenus par la machine à mesurer tridimensionnelle du troisième balancement de la pièce appelée "palier" au chapitre 3 du tableau.24 sont les suivants :

Le défaut de forme nominal est égal à 24.980 mm et le défaut de rectitude (ou étendue) est égal à 0.0122 mm.

On remarque que le défaut de rectitude (ou étendue) obtenu par la MMT est inférieur à la zone de tolérance imposée 0.02 mm. Le résultat de ce programme informatique est validé donc la direction du plan des moindres carrés est dans ce cas satisfaisante.

5.6.1.3. Pièce acceptée avec IT = 0.0122 mm

Le graphe illustré par la figure.5.14 montre l'acceptation de la pièce car la surface géométrique idéale associée est comprise dans l'intervalle de tolérance (étendue de 0.0122 donné par la MMT).

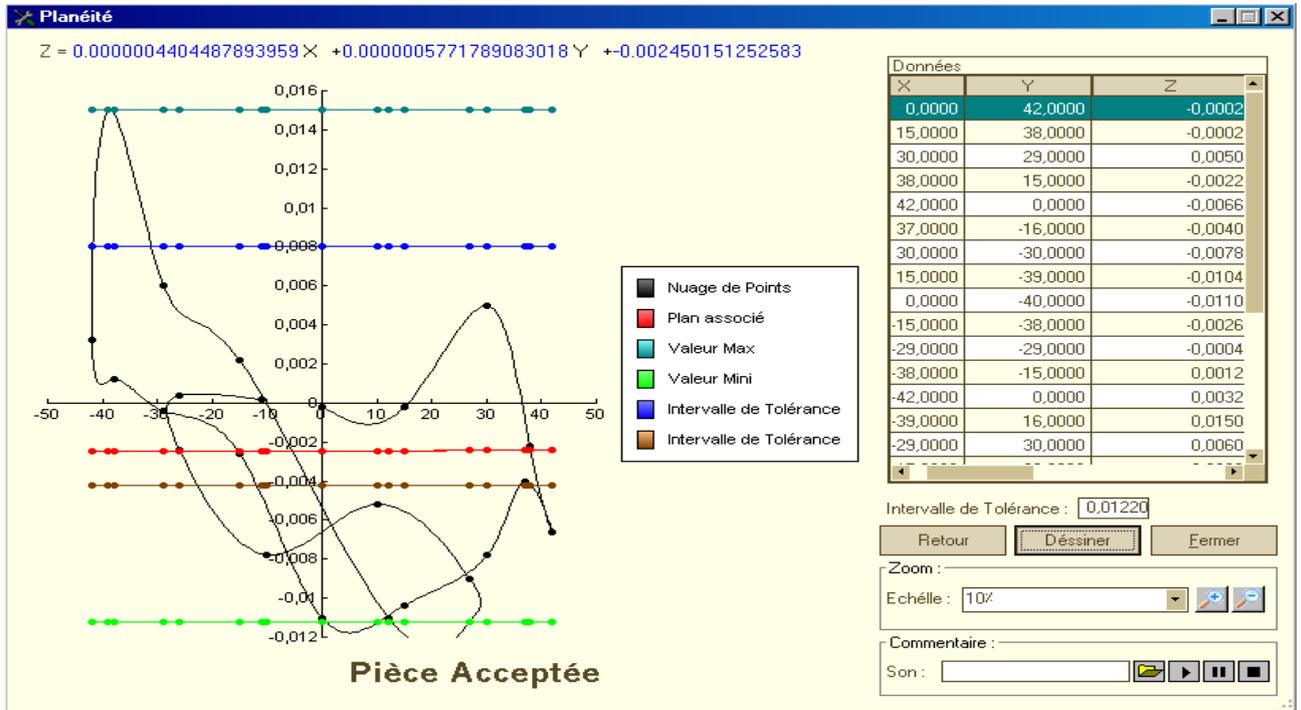


Fig.5.14. Pièce acceptée avec IT = 0.0122mm (planéité)

5.6.1.4. Pièce rejetée avec IT = 0.0087 mm

Le graphe illustré par la figure.5.15 montre le rejet de la pièce car la surface géométrique idéale associée n'est pas comprise totalement dans la zone de tolérance.

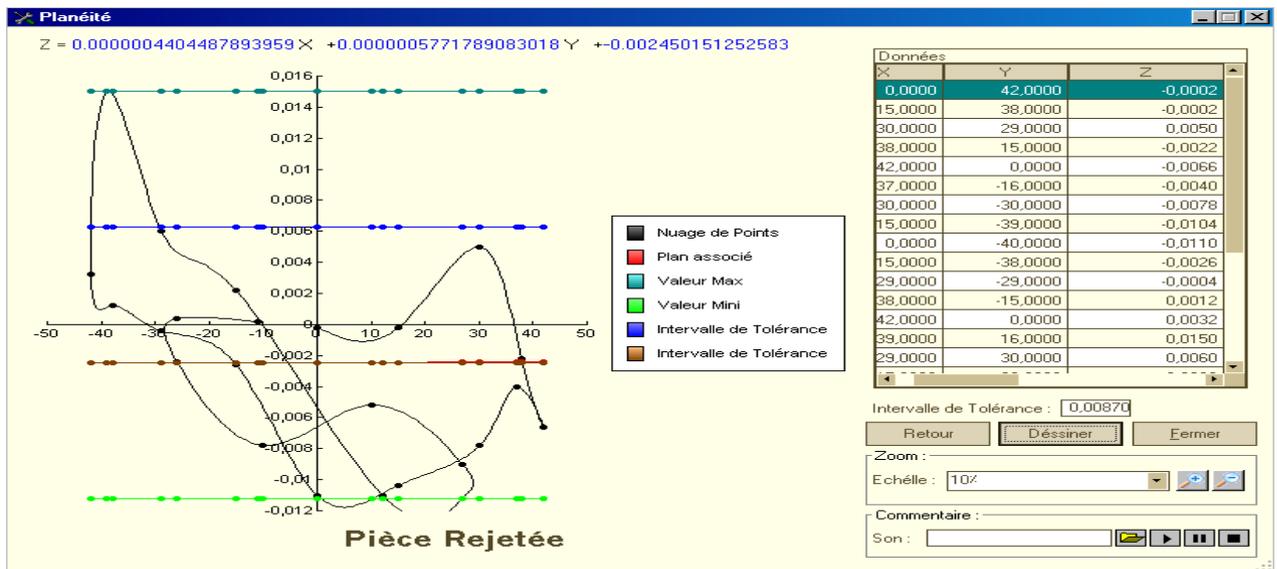


Fig.5.15. Pièce rejetée avec IT = 0.0087 mm (planéité)

On remarque que la valeur approximative de 0.0087 mm trouvée par le programme informatique est le défaut de planéité (ou étendue). La différence des défauts de planéité entre les deux méthodes est : $0.0122 - 0.0087 = 0.0035\text{mm}$; c'est une valeur très petite et approximative.

5.7. Exemple de vérification de la circularité par le programme informatique

5.7.1. vérification de la circularité de la pièce « roulement »

Après le remplissage des champs de la boîte de saisie de la figure.5.5 par les coordonnées (x_i , y_i) des points palpés du contrôle traditionnel du tableau.3.19, des écarts de mesure (z_i) du tableau.3.21 et l'intervalle de tolérance imposé de 0.01mm. L'utilisateur clique du bouton gauche de la souris sur " ok " pour transmettre ces données dans la nouvelle fenêtre illustrée par la figure .5.16 puis sur cette dernière d'un autre clic du bouton gauche de la souris sur "Dessiner" pour validation.

La représentation du graphe de l'élément géométrique associé apparaît sur cette fenêtre. Cette représentation est en 2D.

(Remarque :les couleurs n'apparaissent pas car les cercles sont presque superposés)

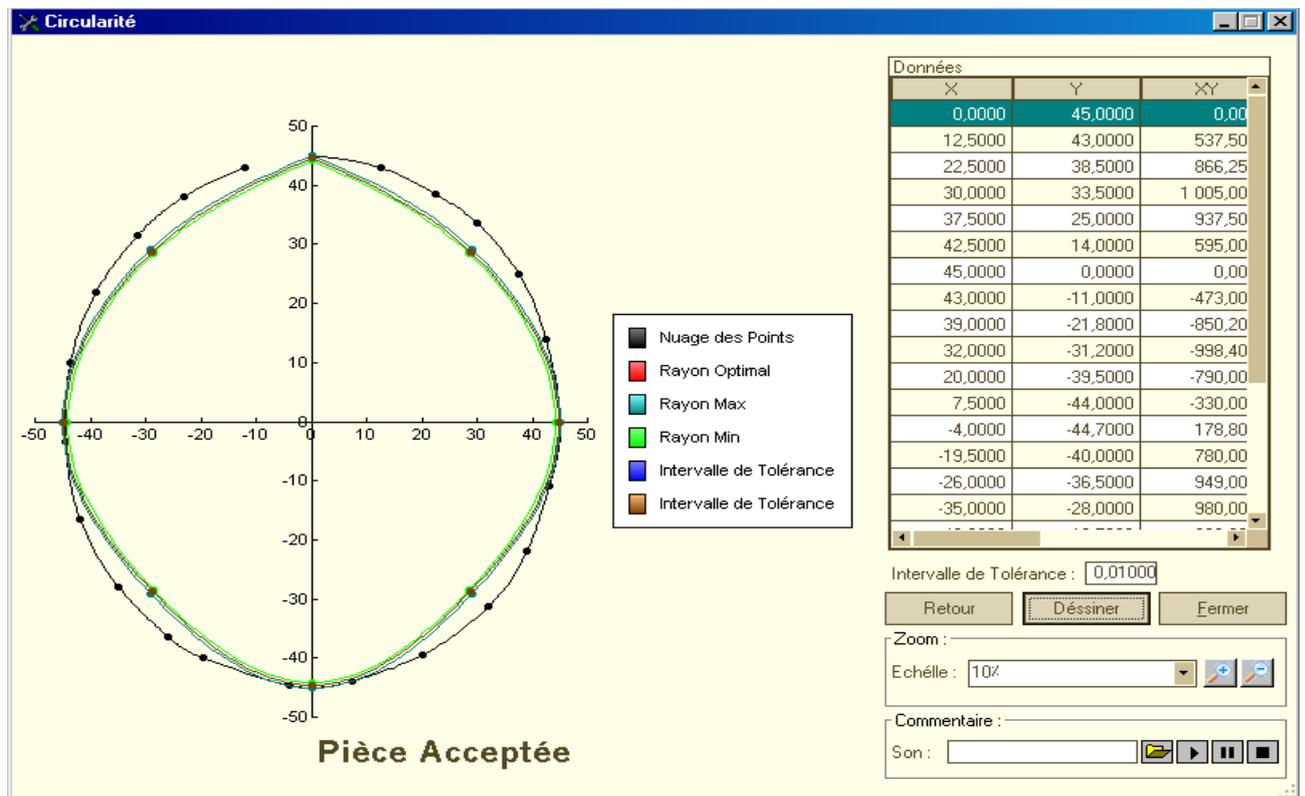


Fig.5.16. pièce acceptée avec IT = 0.01mm(circularité)

5.7.1.1. interprétation du graphe

- les points palpés par le comparateur à cadran sont représentés par des points ronds de couleur (noire), ils sont reliés par une ligne circulaire de couleur (noire)
- la valeur maximale de l'écart de mesure égale à 0.00866mm est portée par le rayon maximal, il est représenté par un cercle de couleur (turquoise)
- la valeur minimale de l'écart de mesure égale à -0.00051mm est portée par le rayon minimal, il est représenté par le cercle de couleur (verte)
- le défaut de forme nominal (Df_n) est compris entre les deux cercles de couleurs (turquoise et verte)
- l'intervalle de tolérance (ou zone de tolérance =0.01) est limité par les deux cercles de couleurs (bleue et marron)
- la modélisation du cercle réelle de la pièce est représentée par le cercle associé de couleur (rouge) de rayon optimal (r_{opt}).

La spécification de forme de cette pièce est alors acceptée par le programme informatique car le cercle géométrique idéal associé est compris dans la zone de tolérance.

5.7.1.2. Comparaison des résultats et validation

les résultats obtenus par la machine à mesurer tridimensionnelle de la pièce appelée "roulement" au chapitre 3 du tableau.24 sont les suivants :

Les défauts de circularité (ou étendues) sont égaux à 0.0053 mm de la première mesure et 0.0079 mm de la deuxième mesure.

On remarque que les défauts de circularité obtenus par la MMT sont inférieurs à de la zone de tolérance imposée 0.01 mm. Le résultat de ce programme informatique est validé donc la direction du cercle des moindres carrés est dans ce cas satisfaisante.

5.7.1.3. Pièce rejetée avec IT = 0.007 mm

Le graphe illustré par la figure.5.17 montre le rejet de la pièce car le cercle géométrique idéal associé n'est pas compris dans l'intervalle de tolérance.

On remarque que la valeur approximative de 0.007 mm est le défaut de circularité trouvée par le programme informatique CAO des points palpés sur la ligne circulaire du roulement.

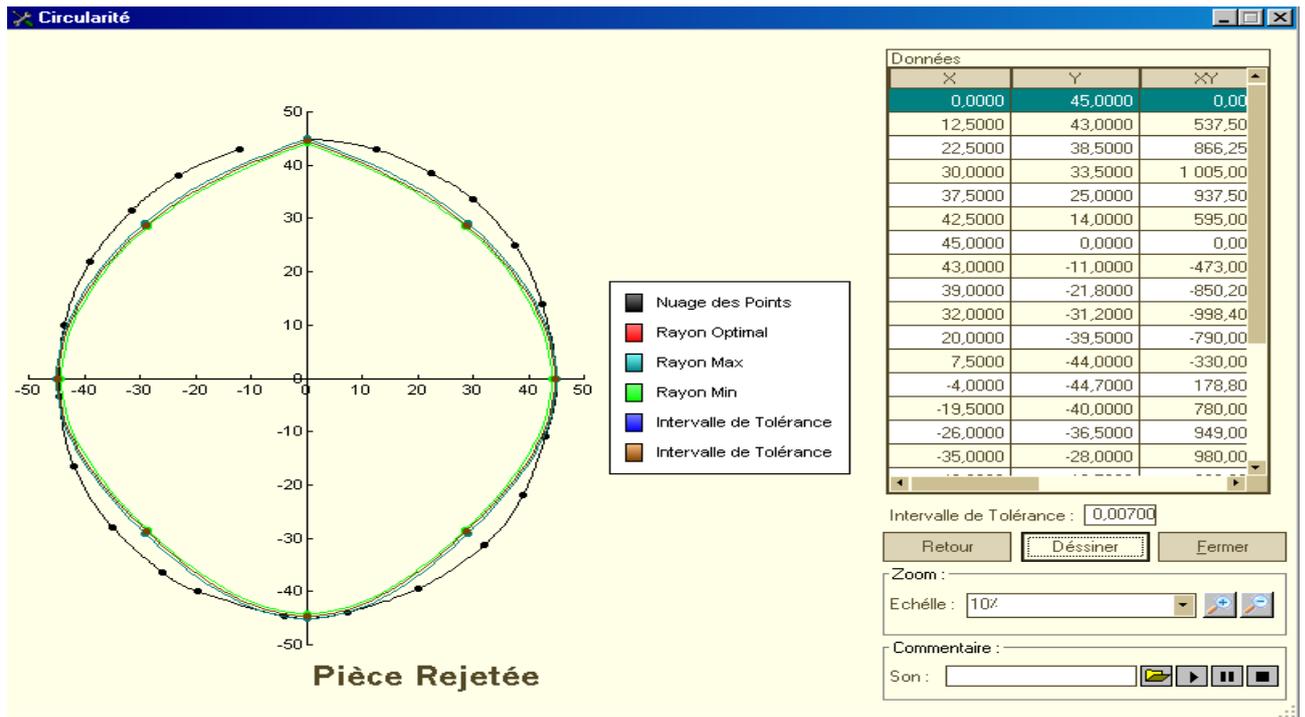


Fig.5.17. pièce rejetée avec IT = 0.007mm (circularité)

5.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthodologie d'utilisation de ce programme développé. Suivant l'intervalle de tolérance choisi ; le métrologue peut déclarer si la pièce est acceptée ou rejetée.

Les défauts d'acceptation (ou étendues) trouvés des pièces par le programme informatique pour les trois spécifications de forme sont presque les mêmes calculés par la machine à mesurer tridimensionnelle.

La modélisation de l'élément géométrique réel par l'élément géométrique idéal associé satisfait la direction générale obtenue par les moindres carrés de cet élément géométrique.

Ce programme s'adapte bien avec le logiciel de la MMT car les résultats sont satisfaisants.

C'est un outil d'aide didactique. L'intégration du multimédia dans la formation et l'apprentissage dans ce programme informatique, facilitera l'explication et la compréhension de ces différentes tâches.

Conclusion Générale et perspective

Le palpé des points sur les surfaces usinées des pièces demande une grande précision de réglage du comparateur à cadran et des instruments associés de contrôle de la part du métrologue pour le relevé des écarts de mesure .

Les différents balancements de la pièce ne donnent pas les mêmes écarts de mesure et les mêmes défauts de forme nominaux. Ce qui explique, par conséquent que le métrologue ne peut pas affirmer que la pièce contrôlée est bonne ou mauvaise (pas d'objectivité).

Afin, d'aider le métrologue à prendre la bonne décision du contrôle ; ce travail a pour but le développement d'un outil informatique d'aide à l'association de surfaces (ou d'éléments géométrique réels) aux points palpés par le comparateur à cadran.

Trois parties ont été développées

La première partie aborde les spécifications géométriques des produits ainsi que les systèmes existant d'association de surfaces aux points palpés sur machine à mesurer tridimensionnelle.

La seconde partie comporte l'étude expérimentale de contrôle des spécifications de forme concernant la rectitude, la planéité et la circularité par la méthode traditionnelle et par la MMT dans le but de faire une comparaison.

La troisième partie été consacrée à l'étude du modèle mathématique du critère d'association de surfaces par les moindres carrés et la conception du programme informatique facilitant au métrologue la bonne décision du contrôle.

On conclut que la représentation de l'élément ou surface géométrique idéale associée s'ajuste au mieux aux points palpés suivant le critère des moindres carrés et a donné des résultats satisfaisants.

Dans notre perspective ; nous souhaitons développer ce programme informatique pour :

- l'élargir aux vérifications des autres spécifications des pièces mécaniques
- ensuite trouver une solution pour l'intégrer comme module dans la machine à mesurer tridimensionnelle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [AMA 03] I. Amara, S. Boukebra, J.M. Linares, B. Necib, décembre 2003, « Modélisation de la chaîne d'acquisition d'une machine à mesurer tridimensionnelle », Revue Sciences et Technologie B, N° 20, Université Mentouri Constantine, Algérie, pp 70-74.
- [ASC 99] G. Asch et Collaborateurs, livre, les capteurs en instrumentation industrielle, 5^{ème} édition 1999 (pages 17-48).
- [AUB 99] M. Aublin, janvier 1999, « exploitation du concept GPS et de la normalisation pour la spécification géométrique des produits » CERPET
- [BAL 93] A. Ballu, 1993, « Identification de modèles géométriques composés pour la spécification et la mesure par coordonnées des caractéristiques fonctionnelles des pièces mécaniques » thèse de doctorat, Lurpa-ENS de cachan, Université de Nancy I.
- [BJO 89] O. Bjoke, « Computer aided tolerancing », ASME Press, Etats-Unis, New-york.
- [BOU 76] P. Bourdet, A. Clément, 1976 « Controlling a complex surface with 3 Axis Measuring Machine », annals of CIRP, vol 25, pages 354-361.
- [BOU 87] P. Bourdet, 1987 thème « contribution à la mesure tridimensionnelle : d'identification géométrique des surfaces, métrologie fonctionnelle des pièces, correction géométrique des machines à mesurer tridimensionnelles » thèse présentée à l'Université de Nancy 1, grade Docteur Es-sciences, soutenue le 23 juin 1987
- [BOU 98] P. Bourdet, L. Mathieu, 1998 « Tolérancement et métrologie dimensionnelle » (Qualité des produits dans les entreprises) Auteurs- Pierre Bourdet (ENS de cachan) Directeur de Lurpa (laboratoire universitaire de recherche en production automatisé). Luc Mathieu (maître Conférences au Conservatoire National des Arts et Métier Centre technique des industries mécaniques (CETIM)
- [BOU 99a] P. Bourdet, fev 1999, Métrologie tridimensionnelle et géométrie des pièces mécanique Université Paris VI – ENS de cachan. Licence de technologie mécanique 1998/1999
- [BOU 99b] P. Bourdet, 1999 « Logiciels des machines à mesurer tridimensionnelle », par Pierre Bourdet professeur à l'école Normale supérieure de cachan. R 1316 3-1999
- [BOU 01] P. Bourdet, février 2001, « Spécification géométrique des produits (GPS) » Université Paris VI – ENS de cachan. Licence de technologie mécanique 2000/2001.
- [CHA 88] K.W. Chase and W.H. Greenwood, March 1988 « Design Issues in Mechanical Tolerance Analysis » Manufacturing Review, ASME, Vol.1, n°1, pp 50-59.
- [CHE 02] A. Chevalier, édition 2002 « Guide du dessinateur industriel », (pages : 46-49, 57-70)
- [CHE 01] A. Chevalier, J. Bohan, mai 2001 « Guide du technicien en productique », (pages : 21, 199-200)

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [CLE 91] A.Clément, A.Desrocher, A.Rivière, 1991 « Théory and practice of 3D tolerancing for assembly ». CIRP Computer Aided Tolerancing 2rd Seminar, Penn state.pages 25-55.
- [CLE 94] A.Clément, A.Rivière, M.Temmerman, 1994 « Cotation tridimensionnelle des systèmes mécaniques » PYC, édition 1994.
- [DEL 92] P. Dechanche, A. Leroy, 1992 « Agencement et écarts de position en conceptique » Technologie et formations, N° 39, p 47-52.
- [DES 91] A. Désrochers, septembre 1999 « Modèle conceptuel du dimensionnement et du tolérancement des mécanismes. Représentation dans les systèmes CFAO », thèse de doctorat en Automatique, Ecole Centrale de Paris.
- [GAV 99] D.Gava, juin 1999 thème : « Vision conoscopique 3D :calibration et reconstruction » thèse de Doctorat. Université Rene DESCARTES, PARIS V France,19 juin 1999 discipline :sciences de la vie et de la matière, spécialité :mathématiques et informatique.
- [HER 76] J.M.Hervé, 1976 « La géométrie du groupe des déplacements appliquée à l'analyse cinématique des mécanismes » thèse d'état, Paris VI, France.
- [LER 92] A.Leroy, 1992, « Etude statistique assistée par ordinateur d'un mécanisme parfait », Technologie et formations, N° 47 , p33-37
- [LIN 96] J.M.Linarès, 1996 « Contribution à l'étude de la cotation fonctionnelle par une approche systémique », thèse de doctorat en mécanique, n° 0114, INSA de Lyon France.
- [PAI 95] E.Pairel, décembre 1995 « Métrologie fonctionnelle par calibre virtuel sur machine à mesurer tridimensionnelle », thèse de doctorat de l'Université de Savoie, France.
- [REN 03] Renishaw, février 2003, « Manuel d'utilisation des systèmes de capteurs à déclenchement », Guide de programmation H-1000-5021-06-B, , édition 02/2003, Renishaw S.A.S 15 rue,Albert Einstein, Champ sur Marne, 77437 Marne la Vallée, Cedex 2, France
- [SAL 80] P.Salmon, revue Industries Techniques (photographier l'invisible) n°415 du 31/01/1980, mesure :les progrès de la métrologie pages 76-80.
- [SEL 99] R.Sellakh, juillet 1999 « contribution à l'intégration de la définition multiniveaux de la géométrie des systèmes mécaniques pour le tolérancement », thèse de Doctorat, Laboratoire de conception et d'analyse de Systèmes mécaniques de l'INSA de Lyon, France.
- [TUR 87] J.U.Turner, M.J. Wozny, 1987 « Tolerances in Computer-aided geometric design ». The visual computer, vol 3, n° , p 214-226.
- [WD9] Windev 9,1984-2004, PC Soft, Montpellier, France.

Liste des normes

- [ANSI Y 14.5M] Dimensioning and tolerancing. The American Society of Mechanical Engineers. New-York:ASME. 1982. 14p.
- [NF E02-102] Tableaux des tolérances fondamentales, Paris : AFNOR, 1965, 3p.
- [NF E02-103] Tableaux des écarts fondamentaux des arbres, Paris : AFNOR, 1965, 4p
- [NF E02-104] Tableaux des écarts fondamentaux des alésages, Paris : AFNOR, 1965, 7p
- [NF E02-204] Vérification des tolérances des produits. Conditions d'acceptations, Paris : AFNOR 1987, 13p.
- [NF E04-541] Dessins techniques, Principe de tolérancement. Principe de l'enveloppe, Paris : AFNOR , 1987, 4p.
- [NF E04-555] Dessins techniques, Tolérancement géométrique – Exigence du maximum de matière, Paris : AFNOR, 1978, 25p.
- [NF E04-558] Dessins techniques. Cotation et tolérancement. Zone de tolérance projetée, Paris : AFNOR, 1983, 14p.
- [NF E04-560] Dessins techniques. Cotation et tolérancement : vocabulaire, Paris : AFNOR, 1985, 20p.
- [NF E04-561] Principe de tolérancement de base, Paris : AFNOR, 1991, 18p.
- [ISO 1101] Dessins techniques- Tolérancement géométrique- Tolérancement de forme, orientation, position et battement : généralités, définitions symboles, indication sur les dessins. Genève : ISO, 1983, 24p.
- [ISO 2692] Dessins techniques, Tolérancement géométrique- principe du maximum de matière, Genève : ISO, 1988, 21p.
- [ISO 3040] Dessins techniques. Cotation et tolérancement- Cônes, Genève :ISO,1990, 6p.
- [ISO 5458] Spécification géométrique des produits (GPS)- Tolérancement géométrique, Tolérancement de localisation, Genève : ISO, 1998, 11p.
- [ISO 5459] Dessins techniques, Tolérancement géométrique- Références spécifiés et systèmes de références pour tolérances géométriques, Genève : ISO, 1981, 16p.
- [ISO 8015] Dessins techniques- Principe de tolérancement de base, Genève : ISO 1985, 5p.

ANNEXE A

TOLERANCES DE FORME

Tolérances de forme						
SYMBOLE						
SIGNIFICATION	Profil d'une surface	Profil d'une ligne	Planéité	Rectitude	Cylindricité	Circularité
TOLERANCE LARGE			0,1mm/m	0,1mm/m	0,04mm/m	IT8
TOLERANCE REDUITE			0,04mm/m	0,02mm/m	0,02mm/m	IT5
Exemple	Illustration de la tolérance			Application		
RECTITUDE						
<p>Une ligne quelconque du plan suivant la direction donnée, doit être comprise entre deux droites parallèles distantes de 0,02. Pour une ligne convexe, les droites sont orientées pour que la valeur h soit minimal.</p>	<p>PLANEITE</p>					
<p>Une partie quelconque de la surface, sur une longueur de 80, doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,05. Orientation des plans: voir rectitude.</p>	<p>CIRCULARITE</p>					
<p>Le profil de chaque section droite doit être compris entre deux cercles coplanaires concentriques dont les rayons diffèrent de 0,02. Le cercle intérieur est le plus grand cercle inscrit.</p>	<p>CYLINDRICITE</p>					
<p>La surface doit être comprise entre deux cylindres coaxiaux dont les rayons diffèrent de 0,05. Le cylindre extérieur est le plus petit cylindre circonscrit.</p>	<p>PROFIL D'UNE SURFACE QUELCONQUE</p>					
<p>La surface tolérancée doit être comprise entre les deux surfaces qui enveloppent l'ensemble des sphère de $\varnothing 0,04$ centrées sur une surface ayant la forme géométrique théorique exacte.</p>						

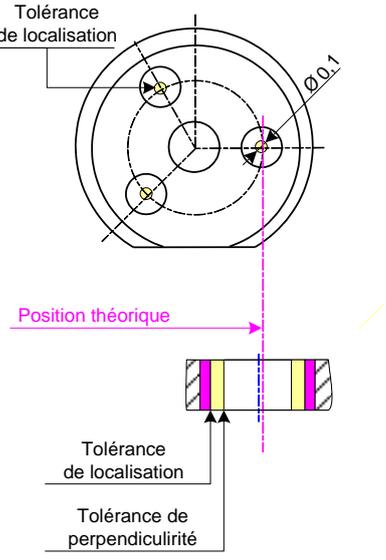
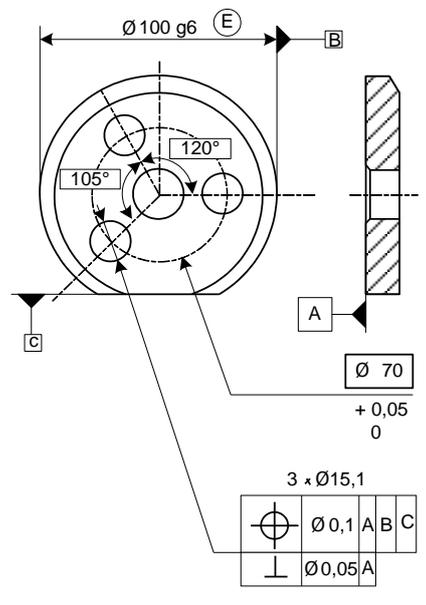
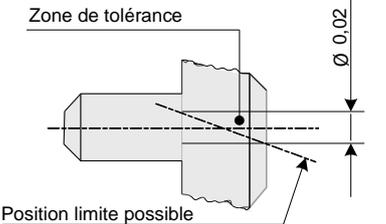
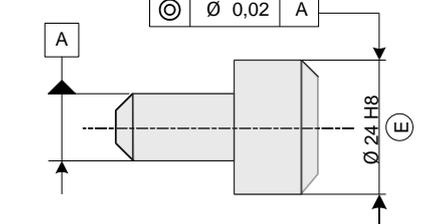
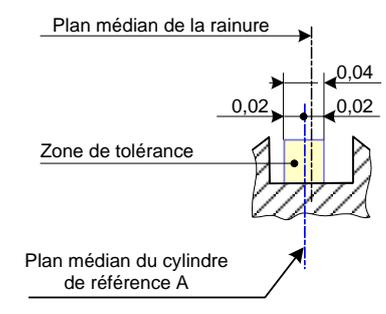
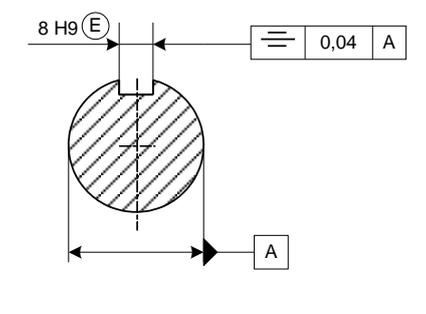
ANNEXE B

TOLERANCES D'ORIENTATION ET DE POSITION

	Tolérances d'orientation			Tolérances de position		
SYMBOLE						
SIGNIFICATION	Inclinaison	Parallélisme	Perpendicularité	Localisation	Coaxialité concentricité	Symétrie
	0,4mm/m	IT9	0,4mm/m	IT11	0,02	IT11
TOLERANCE REDUITE	0,1mm/m	IT5	0,1mm/m	0,02	0,005	0,02
Exemple	Illustration de la tolérance			Application		
<p>PERPENDICULARITE</p> <p>La surface tolérancée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,05 et perpendiculaires au plan de référence A.</p>						
<p>L'axe du cylindre tolérancé doit être compris dans une zone cylindrique de \varnothing 0,02 perpendiculaire au plan de référence A.</p>						
<p>INCLINAISON</p> <p>La surface tolérancée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,08 et inclinés de 45° rapport à l'axe du cylindre de référence A.</p>						
<p>PARALLELISME</p> <p>La surface tolérancée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,05 et parallèles au plan de référence A.</p>						
<p>LOCALISATION</p> <p>L'axe du trou doit être compris dans une zone cylindrique de \varnothing 0,1 dont l'axe est dans la position théorique exacte. A:réfrence primaire (appui plan). B:réfrence secondaire (orientation). C:réfrence tertiaire (butée).</p>						

ANNEXE B (suite)

TOLÉRANCES DE POSITION

Exemple	Illustration de la tolérance	Application
<p style="text-align: center;">LOCALISATION</p> <p>L'axe d'un trou doit être compris dans une zone cylindrique de $\varnothing 0,1$ dont l'axe est dans la position théorique exacte. A: référence primaire (appui plan). B: référence secondaire (linéaire annulaire). C: référence tertiaire (ponctuelle). On outre, le défaut de perpendicularité de l'axe doit rester compris dans une zone cylindrique de $\varnothing 0,05$ perpendiculaire au plan de référence A. NOTA: La zone de tolérance de perpendicularité peut être placée n'importe où à l'intérieur de la zone de tolérance de localisation.</p>		
<p style="text-align: center;">COAXIALITE</p> <p>L'axe du cylindre $\varnothing 24$ h8 doit être compris dans une zone cylindrique de $\varnothing 0,02$ coaxiale à l'axe du cylindre de référence A.</p>		
<p style="text-align: center;">SYMETRIE</p> <p>Le plan médian de la rainure doit être compris entre deux plans parallèles distantes de 0,04 et disposés symétriquement par rapport au plan médian du cylindre. Dans ce cas, l'orientation du plan médian du cylindre est donnée par le plan médian de la rainure.</p>		

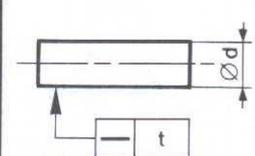
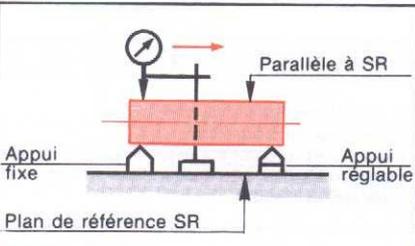
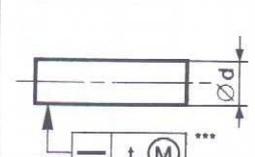
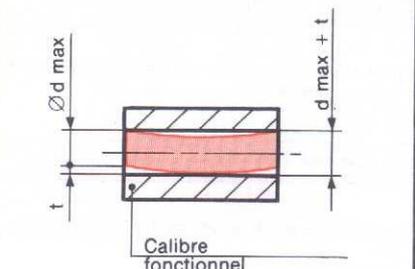
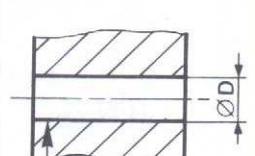
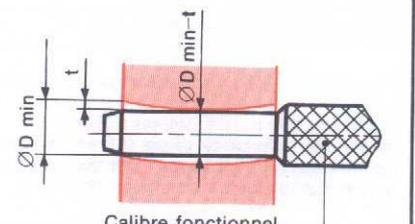
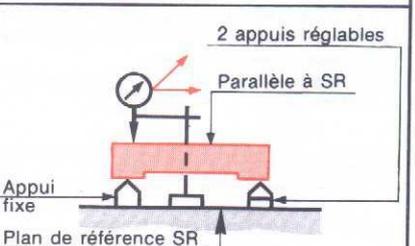
ANNEXE C

TOLERANCES DE BATTEMENT

TOLERANCES DE BATTEMENT			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Les tolérances de battement s'appliquent aux surfaces de révolution. ▪ Les tolérances battement permettent d'exprimer directement les exigences fonctionnelles de surfaces telles que: <ul style="list-style-type: none"> - flasque d'embrayade, roue de friction, galet de roulement, jante de roue 	SYMBOLE		
	SIGNIFICATION	Battement circulaire	
EXEMPLE	ILLUSTRATION DE LA TOLERANCE	APPLICATION	
Battement circulaire axial	<p>Pour chaque $\varnothing d$ du cylindre de mesure</p>		
<p>Le battement circulaire de la ligne tolérancée, lors d'une révolution complète de la pièce autour de l'axe du cylindre de référence, ne doit pas dépasser, séparément pour chaque $\varnothing d$ du cylindre de mesure, la valeur 0,05.</p>			
Battement circulaire radial	<p>Pour chaque position I du plan de mesure</p>		
<p>Le battement circulaire de la ligne tolérancée, lors d'une révolution complète de la pièce autour de l'axe du cylindre de référence A, ne doit pas dépasser, séparément pour chaque position I du plan de mesure, la valeur 0,05.</p>			
Battement circulaire axial	<p>Pour chaque révolution complète de la pièce autour de l'axe du cylindre de référence A, doit être compris entre 2 plans distants de 0,05 et perpendiculaire à l'axe du cylindre de référence.</p> <p>Pratiquement, la zone de tolérance est indentique à celle d'une tolérance de perpendicularité.</p>		
<p>Le battement axial de la surface tolérancée, lors des révolutions complètes de la pièce autour de l'axe du cylindre de référence, doit être compris entre 2 plans distants de 0,05 et perpendiculaire à l'axe du cylindre de référence.</p>			
Battement circulaire radial	<p>Pour chaque révolution complète de la pièce autour de l'axe du cylindre de référence A, doit être compris entre 2 cylindres coaxiaux distants de 0,05 dont les axes coïncident avec l'axe du cylindre de référence A.</p>		
<p>Le battement radial de la surface tolérancée, lors des révolutions complètes de la pièce autour de l'axe du cylindre de référence A, doit être compris entre 2 cylindres coaxiaux distants de 0,05 dont les axes coïncident avec l'axe du cylindre de référence A.</p>			
Battement total dans une direction spécifiée	<p>Pour chaque révolution complète de la pièce autour de l'axe du cylindre de référence, doit être compris entre 2 cônes coaxiaux distants de 0,05 dans la direction donnée et dont les axes coïncident avec l'axe du cylindre de référence.</p>		
<p>Le battement dans la direction spécifiée de la surface tolérancée, lors des révolutions complètes de la pièce autour de l'axe du cylindre de référence, doit être compris entre 2 cônes coaxiaux distants de 0,05 dans la direction donnée et dont les axes coïncident avec l'axe du cylindre de référence.</p>			

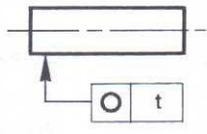
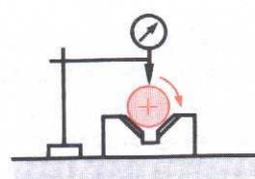
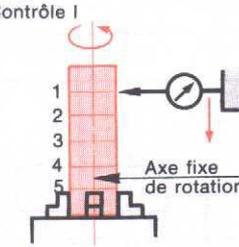
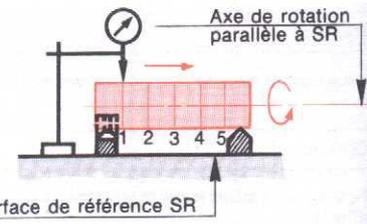
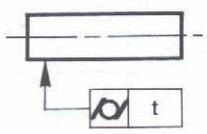
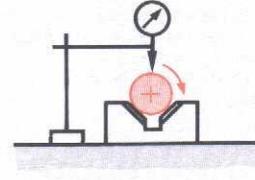
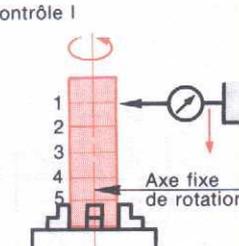
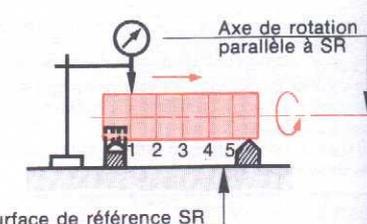
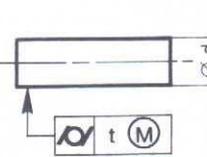
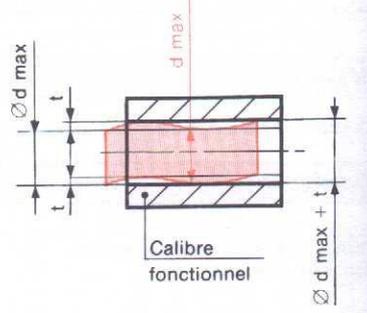
ANNEXE D

VERIFICATIONS GEOMETRIQUES

RECTITUDE		
Tolérance		
Une génératrice doit rester comprise entre deux droites distantes de t .		
Contrôle		
Déplacer le comparateur le long de la génératrice. Écart maximal toléré : t . Répéter la mesure sur n génératrices (minimum 3).		
Tolérance		
La tolérance de rectitude a été calculée en supposant la pièce dans son état maximal de matière avec le défaut de rectitude le plus grand (volume $\varnothing d_{max} + t$). Si la pièce n'est pas dans cet état, elle doit rester inscrite dans le même volume.		
Contrôle		
La pièce doit passer dans le calibre fonctionnel.		
Tolérance		
La tolérance de rectitude a été calculée en supposant la pièce dans son état maximal de matière avec le défaut de rectitude le plus grand (volume $\varnothing D_{min} - t$). Si la pièce n'est pas dans cet état, elle doit rester circonscrite au même volume.		
Contrôle		
Le calibre fonctionnel doit passer dans la pièce.		
PLANÉITÉ		
Tolérance		
La surface doit être comprise entre deux plans distants de t .		
Contrôle		
Déplacer le comparateur sur toute la surface. Écart maximal toléré : t .		

ANNEXE D (suite)

VERIFICATIONS GEOMETRIQUES

CIRCULARITÉ		
Tolérance		Contrôle II
Le profil de chaque section droite doit être compris entre deux circonférences concentriques dont les rayons diffèrent de t . La circonférence extérieure est la plus petite circonférence circonscrite.		
Contrôle I	Contrôle I	
Appareil de mesure de la variation d'un rayon autour d'un centre fixe. Écart maximal toléré : t .		
Contrôle II (contrôle approché)		
La pièce effectue une rotation complète. Écart maximal par section : $2t$. Afin de réduire l'influence des défauts de forme, il est conseillé d'effectuer deux fois cette mesure : l'une avec un vé à 90° , l'autre avec un vé à 120° .	Machine à mesurer*	Surface de référence SR
CYLINDRICITÉ		
Tolérance		Contrôle II
La surface doit être comprise entre deux cylindres coaxiaux dont les rayons diffèrent de t .		
Contrôle I	Contrôle I	
Appareil de mesure de la variation d'un rayon autour d'un axe fixe. Écart maximal toléré : t .		
Contrôle II (contrôle approché)		
Relever les déviations pendant une rotation complète sur n sections. Écart maximal entre tous les points des sections : $2t$. Afin de réduire l'influence des défauts de forme, il est conseillé d'effectuer deux fois cette mesure : l'une avec un vé à 90° , l'autre avec un vé à 120° .	Machine à mesurer*	Surface de référence SR
Tolérance		
La tolérance de cylindricité a été calculée en supposant la pièce dans son état maximal de matière avec le défaut de cylindricité le plus grand (volume $\varnothing d_{max} + t$). Si la pièce n'est pas dans cet état, elle doit rester inscrite dans le même volume.		
Contrôle		
La pièce doit passer dans le calibre fonctionnel.		

ANNEXE E

RAPPORT DE CONTROLE DE LA SEMELLE

ENSET Oran - Dépt de Mécanique - Laboratoire de Métrologie Dimensionnelle

 Metromec	Metromec Software AG Comercialstrasse 20 CH-7007 Chur
	Rapport de Contrôle Metrosoft CM
Pièce : 36 / <u>semelle</u>	Date : 4.01.80

mesure sur référence x-z

n°	élément caractéristique			n° réf.	pp	etendue	nom nom	nom ecart	Mise à profit	tol.
	val. nominale	tol.	limit sup.							
	Droite/plan, palpé			1	ZX	22				
1	Rectitude									
1	0.0000		t= 0.0500				0.0485	0.0485	97%	.-----*
	Droite/plan, palpé			1	ZX	22				
2	Caract.min-max (Z) [min max dist]									
1	min -132.6000		0.1000			-0.1000	min -132.6019	X -0.0019	-2%	----*,-----
	max -132.5000		0.1000			-0.1000	max -132.5394	Y -0.0394	-39%	----*,-----
	d 0.1000		0.1000			-0.1000	d 0.0625	Z -0.0375	-38%	----*,-----
	Droite/plan, palpé			1	ZX	22				
3	Rectitude									
1	0.0000		t= 0.1000				0.0485	0.0485	48%	.----*-----

Le Responsable du Laboratoire: KAROUI Arezki

ANNEXE F

RAPPORT DE CONTROLE DE LA GLISSIERE

ENSET Oran - Dépt de Mécanique - Laboratoire de Métrologie Dimensionnelle

 Metromec	Metromec Software AG Comercialstrasse 20 CH-7007 Chur
	Rapport de Contrôle Metrosoft CM
Pièce : 35 / glissière1	Date : 4.01.80

mesure sur référence X-Z

n°	élément			n° réf.	pp	etendue	nom	nom	Mise à profit tol.
	caractéristique	val. nominale	tol.						
	Droite/plan, palpé			3	ZX	21	0.0112		
8	Rectitude								
1	0.0000		t= 0.0200				0.0112	0.0112	56% .-----*----

mesure sur référence X-Y

	Droite/plan, palpé			4	XY	21	0.0119		
9	Rectitude								
1	0.0000		t= 0.0200				0.0119	0.0119	60% .-----*----

Le Responsable du Laboratoire: KAROUI Arezki

ANNEXE G

RAPPORT DE CONTROLE DU ROULEMENT

ENSET Oran - Dépt de Mécanique - Laboratoire de Métrologie Dimensionnelle

 Metromec	Metromec Software AG Comercialstrasse 20 CH-7007 Chur
	Rapport de Contrôle Metrosoft CM
Pièce : 35 / roulement1	Date : 4.01.80

n°	élément			n° réf.	pp	etendue		nom nom ecart	Mise à profit tol.	
	caractéristique	val. nominale	tol. limit sup.			long. primitive	val. réelle			
	Cercle, palpé			1	XY	23	0.0053			
1	Diamètre									
1	D	90.0000	0.0000		-0.0100	D	89.9995	-0.0005	91%	-----*
	Cercle, palpé			1	XY	23	0.0053			
2	Circularité									
1		0.0000	t= 0.1000				0.0053	0.0053	5%	.*-----
	Cercle, palpé			2	XY	23	0.0079			
3	Diamètre									
1	D	90.0000	0.1000		-0.0100	D	89.9973	-0.0027	-87%	*-----
	Cercle, palpé			2	XY	23	0.0079			
4	Circularité									
1		0.0000	t= 0.1000				0.0079	0.0079	8%	.*-----

Le Responsable du Laboratoire: KAROUI Arezki

Résumé

Exploration des moyens d'association de surfaces aux points palpés sur machine à mesurer tridimensionnelle.

Résumé : ce travail a pour objectif la conception d'un outil d'aide à la programmation de l'association de surfaces aux points palpés avec le comparateur à cadran pour la vérification des spécifications géométriques de forme des pièces fabriquées dans les ateliers de mécanique de petite et moyenne série.

Ce mémoire a été développé en trois parties essentielles.

La première partie est consacrée aux spécifications géométriques des produits ainsi qu'aux caractéristiques de la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) dont l'exploration des systèmes d'association de surfaces existant aux points palpés sur MMT.

Quant à la seconde partie, elle comporte les applications du contrôle des spécifications de forme concernant la rectitude, la planéité et la circularité sur différentes pièces fabriquées avec la méthode traditionnelle utilisant le marbre comme plan de référence, le comparateur à cadran pour relever les écarts de mesure des points palpés par rapport à un axe de mesure, des instruments associés pour le contrôle et la mesure de leurs coordonnées sur les deux autres axes. Les mêmes pièces ont été également contrôlées par la machine à mesurer tridimensionnelle dans le but d'effectuer une comparaison des résultats entre les deux méthodes.

Enfin pour déclarer la conformité des pièces contrôlées, la troisième partie est consacrée à l'étude mathématique des équations des éléments de ces formes géométriques pour déterminer leurs directions générales optimales et à la conception d'un programme informatique CAO pour leurs vérifications

Ce programme remplit deux fonctions. La première fonction consiste à charger les coordonnées de ces points palpés et l'intervalle de tolérance imposé par le dessin de définition de la pièce après avoir choisi la spécification de forme considérée. La seconde fonction traite les calculs par minimisation des moindres carrés en donnant la représentation graphique de l'élément géométrique idéal associé représentatif de ce nuage de points réels et déclare l'acceptation ou le rejet de la pièce.

Mots clés : *critères d'association, points palpés, nuage de points, éléments géométriques réels et idéals, calibre virtuel, contrôle, identification de surfaces.*

Abstract

Exploration of the means of association of surfaces at the contact points on measuring machine three-dimensional.

Abstract : the objective of this work is the design of a tool that assists the programming of the association of surfaces at the contact points with the dial gauge to check the geometrical specifications of form of the manufactured parts in the mechanical workshops of small and average batch production.

This memoire is divided in three essential parts.

The first part is devoted to the geometrical specifications of the products like the characteristics of the Three Axis Measuring Machine (TMM) in the exploration of the systems of association existing at the contact points measured on TMM (or Coordinate Measurement Machine (CMM)).

The second part, it comprises the applications of the control of the specifications of form concerning the straightness, flatness and circularity on various parts manufactured with the traditional method using the marble like datum-line, the gauge dial to raise the variations of measurement of the points palpated compared to an axis of measurement, instruments associated for control and measurement with their co-ordinates on the two other axes. The same parts were also controlled by the Three Axis Measuring Machine with an aim of carrying out a comparison between the two methods.

Finally to declare the conformity of the controlled parts, the third part is devoted to the mathematical study of the equations of the elements of these geometrical forms to determine their optimal general directions and to the design of a software CAD for their checks

This software fulfills two functions. The first function consists in charging the co-ordinates of these points palpated and the interval of tolerance imposed by the design drawing of the part after having chosen the specification of form considered. The second function treats calculations by minimization of least squares by giving to the chart of the geometric standard ideal associate representative of this real group of dots and declares the acceptance or the rejection of the part.

Key words: *criteria of association, contact points, group of dots, real geometric standards and ideals, gauges virtual, inspection, control, checking, identification of surfaces*

المخلص

الغاية من هذا العمل هو إعداد برمجة أداة مساعدة لاشتراك السطوح بالنقاط الملتزمة بواسطة الجهاز المقارن لمراقبة المواصفات الهندسية الشكلية على القطع المصنعة داخل ورشات الميكانيك بالسلسلة الصغيرة و المتوسطة.

تنقسم هذه المذكرة إلى ثلاثة أجزاء أساسية :

يتضمن الجزء الأول المواصفات الهندسية للمنتجات (GPS) و مميزات آلة القياس ثلاثية الأبعاد (MMT) مع استكشاف أساليب اشتراك السطوح بالنقاط المقاسة (الملتزمة) الموجودة على هذه الآلات.

أما الجزء الثاني فيحتوي على تطبيقات لمراقبة المواصفات الهندسية الشكلية على قطع مشغلة و مختلفة بالطريقة التقليدية التي تخص الاستقامة، الاستواء و الاستدارة بحيث نستعمل زهرة الاستواء كسطح مرجعي أما الجهاز المقارن لأخذ الانحرافات البعدية لمختلف النقاط الملتزمة بالنسبة لمحور القياس و وسائل مشاركة أخرى للمراقبة و قياس إحداثياتها على المحورين الآخرين. كما تراقب هذه القطع بواسطة آلة القياس ثلاثية الأبعاد؛ ونجري مقارنة بين الطريقتين.

وأخيرا لتصريح على صحة المراقبة يتضمن الجزء الثالث على دراسة رياضية لمعادلات عناصر هذه الأشكال الهندسية للبحث على اتجاهاتها العامة و المثالية (المفضلة) و على إنشاء برنامج (CAO) خاص لهذه المراقبة

يحتوي هذا البرنامج على وظيفتين

تتضمن الوظيفة الأولى: إدخال إحداثيات النقاط الملتزمة و مجال السماح المفروض من قبل الرسم التعريفي للقطعة داخل البرنامج بعد الضغط على زر المواصفة الهندسية المناسبة.

أما الوظيفة الثانية تشمل معالجة الحسابات بالمربعات الدنيا (Moindres carrés) مع الرسم البياني للعنصر الهندسي المشارك المثالي الذي يمثل مجموع النقاط الحقيقية و تصرح على قبول أو عدم القبول للقطعة.

الكلمات المفتاحية: معايير المشاركة، النقاط الملتزمة، مجموعة من النقاط، العناصر الهندسية الحقيقية و المثالية، معيار افتراضي، تفتيش، مراقبة، فحص، تحقيق للسطوح الهندسية

Conclusion Générale et perspective

Le palpé des points sur les surfaces usinées des pièces demande une grande précision de réglage du comparateur à cadran et des instruments associés de contrôle de la part du métrologue pour le relevé des écarts de mesure .

Les différents balancements de la pièce ne donnent pas les mêmes écarts de mesure et les mêmes défauts de forme nominaux. Ce qui explique, par conséquent que le métrologue ne peut pas affirmer que la pièce contrôlée est bonne ou mauvaise (pas d'objectivité).

Afin, d'aider le métrologue à prendre la bonne décision du contrôle ; ce travail a pour but le développement d'un outil informatique d'aide à l'association de surfaces (ou d'éléments géométrique réels) aux points palpés par le comparateur à cadran.

Trois parties ont été développées

La première partie aborde les spécifications géométriques des produits ainsi que les systèmes existant d'association de surfaces aux points palpés sur machine à mesurer tridimensionnelle.

La seconde partie comporte l'étude expérimentale de contrôle des spécifications de forme concernant la rectitude, la planéité et la circularité par la méthode traditionnelle et par la MMT dans le but de faire une comparaison.

La troisième partie été consacrée à l'étude du modèle mathématique du critère d'association de surfaces par les moindres carrés et la conception du programme informatique facilitant au métrologue la bonne décision du contrôle.

On conclut que la représentation de l'élément ou surface géométrique idéale associée s'ajuste au mieux aux points palpés suivant le critère des moindres carrés et a donné des résultats satisfaisants.

Dans notre perspective ; nous souhaitons développer ce programme informatique pour :

- l'élargir aux vérifications des autres spécifications des pièces mécaniques
- ensuite trouver une solution pour l'intégrer comme module dans la machine à mesurer tridimensionnelle.