

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

**Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen**



**Département de Génie Electrique et Electronique**

**Projet de Fin d'Etudes**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en **Génie Industriel**

Option : **Ingénierie de production**

Présenté par :

**BADLIS Youcef & GRERIFA Youssouf**

*Thème*

**DEVELOPPEMENT D'UN LOGICIEL POUR LA  
MESURE DES DEFAUTS DE FORME DES  
PIECES MECANIQUES - PLANEITE**

Soutenu publiquement, le Mardi 19 Juin 2018, devant le jury composé de :

|                            |              |               |
|----------------------------|--------------|---------------|
| <b>M. A. BENSMINE</b>      | Président    | Univ. Tlemcen |
| <b>M. D. MOULAI-KHATIR</b> | Encadreur    | Univ. Tlemcen |
| <b>M. H. BETAOUAF</b>      | Co-encadreur | Univ. Tlemcen |
| <b>M. A. MANGOUCI</b>      | Examineur    | Univ. Tlemcen |
| <b>Mme. N. BENSMINE</b>    | Examineur    | Univ. Tlemcen |

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# REMERCIEMENTS

Nous remercions Dieu de nous avoir aidé à terminer ce modeste travail.

Nous tenons à remercier M. MOULAI-KHATIR Djezouli d'avoir accepté de diriger ce projet, ainsi que pour son entière disponibilité et ses précieux conseils durant toute la période de l'élaboration de ce travail.

Aussi nos remerciements vont à notre Co-encadreur M. BETAOUAF Hichem pour sa disponibilité.

Nous remercions M. BENSMINE Abderrahmane de nous avoir honoré en acceptant de présider le jury de soutenance de ce PFE.

Nous remercions également M. MANGOUCI Ahmed et Mme. BENSMINE Nardjes d'avoir accepté d'examiner le contenu scientifique de notre travail.

Que Messieurs MIRI S. et RIMOUCHE A. acceptent nos remerciements pour leurs aides durant l'élaboration des algorithmes mathématiques.

Que toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail trouve ici toute notre gratitude.

*BADLIS Youcef*  
*GRIRIFA Youssef*

## *Dédicaces*

*A mes parents pour leur soutien moral ;*

*A mes frères et sœurs ;*

*A mes oncles et mes cousins ;*

*A toute la famille grands et petits ;*

*A mes amis, mes voisins ;*

*A tous mes enseignants de la faculté Technologie de l'université*

*Abou Bakr Belkaid Tlemcen ;*

*A tous ceux qui se sont sacrifiés pour notre instruction et la  
construction de notre savoir.*

*BADLIS Youcef*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études ;*

*A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement ;*

*A mes chères sœurs, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral ;*

*A tous mes amis auxquelles j'ai partagé les meilleurs moments de ma vie ;*

*A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire ;*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

*GRERIFA Youssouf*

## Résumé

La détermination des défauts de forme revêt une très grande importance dans le domaine industriel, car elle conditionne dans bien des cas la fonctionnalité des assemblages ou des mécanismes. La mesure directe des défauts de forme est très difficile et elle entachée d'erreurs. Dans cette optique, notre travail présente un logiciel destiné pour la mesure des défauts de forme des pièces mécaniques usinées. Nous avons utilisé deux critères d'ajustements, des moindres carrés (Sei2) et celui de Tchebychev (Minimax). Le critère moindres carrés est le plus pratiqué (et souvent le seul disponible sur les machines à mesurer tridimensionnelles). Il est facile à exploiter et à programmer, par un simple calcul matriciel. Théoriquement, ce critère n'est pas satisfaisant, car le résultat dépend de la répartition des points sur la surface à contrôler (une sur densification "tire" la surface associée), pour cela, nous avons adopté une stratégie de répartition uniforme des points de palpation. Le critère de Tchebychev (Minimax) est plus complexe à programmer. Lors de sa programmation nous avons suivi trois étapes : trouver le « convex hull » par l'algorithme de Graham, puis trouver le bord convexe avec la plus petite erreur possible enfin l'ajustement Minimax est donné par le plan entre le bord le plus petit accidenté de la coque convexe et le point le plus éloigné. Une étude comparative a été réalisée pour la vérification des résultats trouvés par notre logiciel GFDSOFT et deux autres logiciels (expérimental et industriel). Pour sa validation, notre logiciel a été testé avec succès sur une étude de cas réels (pièces industrielles).

**Mots-Clés :** Métrologie, MMT, critères d'ajustements, Points palpés, Moindres carrés, Tchebychev.

## Abstract

The determination of form defects has a great importance in the industrial field, as it determines in many cases the functionality of assemblies or mechanisms. Direct measurement of form defects is very difficult and tainted with errors. In this context, our work presents a software intended for the measurement of the defects of form of the machined mechanical parts. We used two adjustment criteria, least squares (Sei2) and Chebyshev (Minimax). The least squares criterion is the most practiced (and often the only one available on three-dimensional measuring machines). It is easy to use and program by a simple matrix calculation. Theoretically, this criterion is not satisfactory because the result depends on the distribution of the points on the surface to be controlled (one on densification "pulls" the associated surface), for this reason, we adopted a strategy of uniform distribution of the points of probe. Chebyshev (Minimax) criterion is more complex to program. During its programming, we have followed three steps: finding the convex hull by Graham's algorithm and then finding the convex hull with the smallest possible error, finally the Minimax adjustment is given by the plane between the smallest hilly edge of the convex hull and the farthest point. A comparative study was carried out for the verification of the results found by our software GFDSOFT and two other software (experimental and industrial). For validation, our software has been successfully tested on a real case study (industrial parts).

**Key Words:** Metrology, MMT, Adjustment Criteria, Palpated Points, Least Squares, Chebyshev.

## المخلص

تحديد عيوب شكل الأجزاء الميكانيكية له أهمية كبيرة في المجال الصناعي، لأنه يحدد في كثير من الحالات وظائف التجمعات أو الآليات. القياس المباشر لعيوب الشكل صعب للغاية ومليء بالأخطاء. في هذا السياق، يقدم عملنا برنامجًا مخصصًا لقياس عيوب شكل الأجزاء الميكانيكية الآلية. استخدمنا معيارين للتعديل، المربعات الصغرى (Sei2) و (Chebyshev Minimax). معيار المربعات الصغرى هو الأكثر استخدامًا (وغالبًا ما يكون الوحيد المتاح على آلات القياس ثلاثية الأبعاد). فمن السهل استخدام البرنامج عن طريق حساب مصفوفة بسيطة. من الناحية النظرية، وهذا المعيار ليس مرضيًا، لأن النتيجة تعتمد على توزيع النقاط على سطح اختبار (التكثيف من "تسحب" سطح المرتبطة بها). لهذا فقد اعتمدنا موحدة نقاط استراتيجية التخصيص التحقيق. معيار (Chebyshev Minimax) هو أكثر تعقيدًا لبرنامج. في برامجنا نتبع ثلاث خطوات: العثور على بدن محدب غراهام الخوارزمية، ثم العثور على حافة محدبة مع أصغر خطأ ممكن أخيرا يعطى تعديل (Minimax) بواسطة الطائرة بين أصغر حافة الوعرة بدن محدب وأبعد نقطة. وقد أجريت دراسة مقارنة للتحقق من النتائج التي عثر عليها برنامجنا (GFDSOft) واثنين من البرامج الأخرى (التجريبية والصناعية). للتحقق من الصحة، تم اختبار برنامجنا بنجاح على دراسة حالة حقيقية (الأجزاء الصناعية).

الكلمات المفتاحية: علم القياس، MMT، معايير التعديل، نقاط ملموسة، المربعات الصغرى، Chebyshev.

# Sommaire

---

|                                   |          |
|-----------------------------------|----------|
| <b>Introduction générale.....</b> | <b>1</b> |
|-----------------------------------|----------|

## **Chapitre 1 : Métrologie au marbre**

|  |    |
|--|----|
| 1.1 Introduction.....  | 5  |
| 1.2 Métrologie.....  | 5  |
| 1.3 Métrologie au marbre.....  | 5  |
| 1.4 Mesure des principales spécifications sur le plan.....                       | 6  |
| 1.4.1 Localisation d'un plan.....  | 6  |
| 1.4.2 Parallélisme d'un plan.....  | 7  |
| 1.4.3 Perpendicularité d'un plan.....  | 7  |
| 1.4.4 Symétrie d'une rainure.....  | 8  |
| 1.4.5 Localisation d'un plan incliné.....  | 9  |
| 1.4.6 Orientation d'un plan incliné.....   | 11 |
| 1.4.7 Planéité d'un plan.....  | 11 |
| 1.5 Zones de tolérances.....   | 13 |
| 1.6 Classification des tolérances géométriques.....                              | 13 |
| 1.6.1 Tolérances de forme.....   | 13 |
| 1.6.2 Tolérances d'orientation.....  | 14 |
| 1.6.3 Tolérances de position.....  | 14 |
| 1.6.4 Tolérances de battement.....   | 14 |
| 1.7 Remarques sur les différentes tolérances proposées par la normalisation..... | 16 |
| 1.7.1 Tolérances de forme.....   | 16 |
| 1.7.2 Tolérance d'orientation.....   | 17 |
| 1.7.3 Tolérance de position.....   | 17 |
| 1.7.4 Tolérance de battement.....  | 17 |
| 1.8 Différents types de contrôle.....  | 17 |
| 1.8.1 Contrôle de réception.....   | 17 |



|   |    |
|---|----|
| 1.8.2 Contrôle en cours de fabrication..... | 17 |
| 1.8.3 Contrôle final.....                   | 17 |
| 1.9 Conclusion.....                         | 18 |

## **Chapitre 2 : Mesure sur machine à mesurer tridimensionnelle**

|  |    |
|--|----|
| 2.1 Introduction.....  | 20 |
| 2.2. Historique.....   | 20 |
| 2.3 Machine à mesurer tridimensionnelle.....                           | 20 |
| 2.4 Etat de l'art en métrologie tridimensionnelle.....                 | 21 |
| 2.5 Différents types de machines à mesure tridimensionnelle.....       | 22 |
| 2.5.1 Machine de type portique.....                                    | 22 |
| 2.5.2 Machine de type col de cygne.....                                | 22 |
| 2.5.3 Machine de type pont mobile.....                                 | 23 |
| 2.6 Différents types de palpeurs.....                                  | 24 |
| 2.6.1 Palpeurs à contact (à déclenchement).....                        | 24 |
| 2.6.1.1 Caractéristiques métrologiques du palpeur à déclenchement..... | 24 |
| 2.6.1.2 Système de palpation dynamique.....                            | 24 |
| 2.6.1.3 Principe de fonctionnement.....                                | 25 |
| 2.6.1.4 Présentation des palpeurs.....                                 | 25 |
| 2.6.2 Palpeurs à contact (mesurant).....                               | 26 |
| 2.6.3 Palpeurs sans contact.....                                       | 26 |
| 2.7 Processus de mesure.....   | 27 |
| 2.7.1 Principe.....  | 27 |
| 2.7.2 Lecture du dessin.....   | 27 |
| 2.7.3 Choix du posage.....   | 28 |
| 2.7.4 Conception du palpeur.....                                       | 28 |
| 2.7.5 Le calibrage.....  | 29 |
| 2.7.6 Palpage et les constructions.....                                | 30 |
| 2.7.7 Dépouillement.....   | 30 |
| 2.7.8 Mode opératoire.....   | 30 |
| 2.8 Conclusion.....  | 32 |

## Chapitre 3 : Différents critères d'ajustements

|   |    |
|---|----|
| 3.1 Introduction .....  | 34 |
| 3.3 Critères normalisés .....   | 34 |
| 3.3.1 Critère des moindres carrés .....   | 34 |
| 3.3.1.1 Historique.....   | 34 |
| 3.3.1.2 Association par le critère des moindres carrés.....                       | 34 |
| 3.3.1.3 Critère des moindres carrés « tangent » :.....                            | 35 |
| 3.3.1.4 Surface des moindres carrés décalée de la moitié du défaut de forme ..... | 35 |
| 3.3.2 Critère de Tchebychev (Minimax) .....                                       | 36 |
| 3.3.3 Critère Rmini et Rmaxi .....  | 36 |
| 3.4 Nombre de points nécessaire pour le critère des moindres carrés.....          | 37 |
| 3.5 Influence de la densité des points sur l'algorithme des moindres carrés ..... | 37 |
| 3.6 Identification le plan des moindres carrés.....                               | 38 |
| 3.7 Etude comparative entre les critères.....                                     | 40 |
| 3.8 Commentaire du tableau.....   | 41 |
| 3.9 Conclusion.....   | 42 |

## Chapitre 4 : Programmation et validation

|   |    |
|---|----|
| 4.1 Introduction .....                                  | 44 |
| 4.2 Programmation .....                                 | 44 |
| 4.3 Algorithmes et interfaces graphiques .....          | 44 |
| 4.3.1 Vérification du nombre de points palpés .....     | 44 |
| 4.3.2 Algorithme de calcul du défaut de planéité .....  | 45 |
| 4.3.3 Format des fichiers de points.....                | 45 |
| 4.3.4 Interface du programme .....                      | 46 |
| 4.4 Ajustement par le critère des moindres carrés ..... | 47 |
| 4.4.1 Application à une pièce test.....                 | 47 |

|  |           |
|--|-----------|
| 4.4.2 Application à la pièce de M. Mangouchi.....              | 49        |
| 4.4.3 Application à la pièce de M. Jalid .....                 | 54        |
| 4.4.4 Application à des surfaces déformées numériquement ..... | 55        |
| 4.5 Ajustement par le critère de Tchebychev (Minimax).....     | 57        |
| 4.5.1 Application à la face usinée de la pièce test .....      | 57        |
| 4.5.2 Application à la face sciée de la pièce test .....       | 58        |
| 4.6 Conclusion.....  | 59        |
| <b>Conclusion générale et perspective.....</b>                 | <b>60</b> |
| <b>Références Bibliographiques.....</b>                        | <b>63</b> |
| <b>Annexe A.....</b>   | <b>68</b> |
| <b>Annexe B.....</b>   | <b>72</b> |
| <b>Liste des normes.....</b>                                   | <b>74</b> |

## Liste des figures

---

### Chapitre 1

|   |    |
|---|----|
| Figure 1.1 Mesure différentielle.....   | 6  |
| Figure 1.2 Mesure de la localisation .....  | 6  |
| Figure 1.3 Méthode différentielle.....  | 6  |
| Figure 1.4 Mesure d'un parallélisme.....  | 7  |
| Figure 1.5 Mesure de la variation des écarts .....                                | 7  |
| Figure 1.6 Perpendicularité du plan .....   | 7  |
| Figure 1.7 Mesure de la perpendicularité.....                                     | 8  |
| Figure 1.8 Mesure de la perpendicularité.....                                     | 8  |
| Figure 1.9 Définition de la symétrie.....   | 9  |
| Figure 1.10 Mesure de la symétrie .....   | 9  |
| Figure 1.11 Calcul de la symétrie.....  | 9  |
| Figure 1.12 Position et inclinaison d'un plan incliné.....                        | 10 |
| Figure 1.13 Mesure d'un plan incliné .....  | 10 |
| Figure 1.14 Mise à zéro du comparateur.....                                       | 10 |
| Figure 1.15 Mesure de l'inclinaison.....  | 11 |
| Figure 1.16 planéité d'un plan.....   | 11 |
| Figure 1.17 Désignation des points sur la surface (S) à contrôler.....            | 12 |
| Figure 1.18 Contrôle de la planéité sur marbre de la surface (S) à contrôler..... | 13 |

## Chapitre 2

|   |    |
|---|----|
| Figure 2.1. Machine à mesure tridimensionnelle .....          | 21 |
| Figure 2.2 MMT de type portique .....                         | 22 |
| Figure 2.3 MMT de type col de cygne .....                     | 23 |
| Figure 2.4 MMT de type pont mobile .....                      | 23 |
| Figure 2.5 Palpeur à déclenchement dynamique.....             | 24 |
| Figure 2.6 Appui cinématique .....                            | 25 |
| Figure 2.7 palpeur à mesure statique.....                     | 26 |
| Figure 2.8 palpeur mesurant.....                              | 26 |
| Figure 2.9 palpeur à fibre optique .....                      | 27 |
| Figure 2.10 Processus de mesure .....                         | 27 |
| Figure 2.11 Mise en position de la pièce sur la machine ..... | 28 |
| Figure 2.12 Palpeur de mesure .....                           | 29 |
| Figure 2.13 Calibrage du palpeur .....                        | 29 |
| Figure 2.14 Calibrage d'un palpeur étoile.....                | 30 |
| Figure 2.15 Repère pièce.....                                 | 30 |
| Figure 2.16 Mode opératoire de la gamme de mesure .....       | 31 |
| Figure 2.17 Ordre des opérations de mesure.....               | 32 |

## Chapitre 3

|   |    |
|---|----|
| Figure 3.1 Plan et cercle des moindres carrés ..... | 35 |
|---|----|

|   |    |
|---|----|
| Figure 3.2 Surface des moindres carrés tangente ..... | 35 |
| Figure 3.3 Surface des moindres carrés décalée .....  | 36 |
| Figure 3.4 Surfaces minimax .....                     | 36 |
| Figure 3.5 Critère $R_{mini}$ et $R_{maxi}$ .....     | 37 |
| Figure 3.6 Influence de la densité de points .....    | 37 |

## Chapitre 4

|  |    |
|--|----|
| Figure 4.1 Algorithme de vérification du nombre de points palpés .....                                     | 44 |
| Figure 4.2 Message de vérification du nombre de points palpés .....  | 45 |
| Figure 4.3 Algorithme de calcul du défaut de planéité .....  | 45 |
| Figure 4.4 Format du fichier de points .....   | 46 |
| Figure 4.5 Interface du programme .....  | 46 |
| Figure 4.6 Résultat du traitement du fichier de 25 points de la face usinée.....                           | 47 |
| Figure 4.7 Résultat du traitement du fichier de 81 points de la face usinée.....                           | 48 |
| Figure 4.8 Résultat du traitement du fichier de 25 points de la face sciée.....                            | 48 |
| Figure 4.9 Résultat du traitement du fichier de 81 points de la face sciée.....                            | 49 |
| Figure 4.10 Contrôle de la planéité du palier sur MMT du Laboratoire de Métrologie (ENP d'Oran) .....      | 49 |
| Figure 4.11 Troisième balancement .....  | 51 |
| Figure 4.12 Résultat du traitement de la pièce de Mangouchi .....  | 52 |
| Figure 4.13 Graphe de la comparaison des résultats du contrôle de la planéité par GFDSOft et Geoverif..... | 53 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 4.14 Graphe de la comparaison des résultats du contrôle de la planéité par GFDSOft et Metrosoft ..... | 53 |
| Figure 4.15 Résultat du traitement du nuage de points de la pièce de Jalid.....                              | 55 |
| Figure 4.16 Résultat du traitement de 25 points de la face usinée par le critère Minimax .....               | 57 |
| Figure 4.17 Résultat du traitement de 81 points de la face usinée par le critère Minimax .....               | 58 |
| Figure 4.18 Résultat du traitement de 25 points de la face sciée par le critère Minimax .....                | 58 |
| Figure 4.19 Résultat du traitement de 81 points de la face sciée par le critère Minimax .....                | 59 |

## Liste des tableaux

---

### Chapitre 1

|   |    |
|---|----|
| Tableau 1.1 Tolérances géométriques normalisées de forme .....      | 14 |
| Tableau 1.2 Tolérances géométriques normalisées d'orientation ..... | 15 |
| Tableau 1.3 Tolérances géométriques normalisées de position .....   | 15 |
| Tableau 1.4 Tolérances géométriques normalisées de battement .....  | 16 |

### Chapitre 2

|  |    |
|--|----|
| Tableau 2.1 Force de déclenchement ..... | 26 |
|--|----|

### Chapitre 3

|   |    |
|---|----|
| Tableau 3.1 Nombre minimal de points palpés ..... | 37 |
| Tableau 3.2 choix du critère .....                | 41 |

### Chapitre 4

|   |    |
|---|----|
| Tableau 4.1 Coordonnées des points palpés du premier et du deuxième balancement .....   | 50 |
| Tableau 4.2 Coordonnées des points palpés du troisième balancement .....  | 51 |
| Tableau 4.3 Coordonnées des points palpés de la pièce de Jolid .....  | 54 |
| Tableau 4.4 Visualisations des surfaces modales et l'évolution du défaut de forme mesuré en utilisant les logiciels GFDSOft et Geoverif ..... | 56 |



## Liste des abréviations

---

|         |  |
|---------|--|
| 2D :    | Deux dimensions                        |
| 3D :    | Trois dimensions                       |
| AFNOR : | Association Française de normalisation |
| CCD :   | Charge-Coupled Device                  |
| CNC :   | Machine à Commande Numérique           |
| ISO :   | International Standard Organization    |
| LS :    | Least Square (Moindres carrés)         |
| MMT :   | Machine à Mesurer Tridimensionnelle    |
| MUL :   | Machine à Mesurer Universelle Linéaire |

# INTRODUCTION GENERALE

La vérification et le contrôle des défauts de forme connaissent actuellement une très grande importance dans le domaine industriel, car dans bien des cas, la fonctionnalité des assemblages ou des mécanismes peut en dépendre. Le contrôle classique (au marbre) des défauts de forme est entaché d'erreurs. Lors de la mesure de la planéité, le métrologue utilise généralement un marbre sur lequel il pose le socle du comparateur et trois vérins (supports) réglables. Il place les vérins en forme de triangle (pour avoir un plan). Ensuite, il pose la pièce sur les trois vérins. Il met le palpeur du comparateur perpendiculaire et en contact avec la surface à contrôler (S). Puis, il règle les vérins de façon à ce que le comparateur marque "zéro" respectivement en trois points (A, B et C) de la surface (S). Le plan (ABC) est maintenant parallèle à la surface de référence du marbre, il définit ainsi la surface géométrique idéale. Enfin, il palpe des points au niveau de la surface à contrôler par le palpeur du comparateur en faisant glisser le socle de ce dernier, sur le marbre tout en relevant les écarts de mesure. Les méthodes directes de mesure ne permettent pas de déterminer un défaut de forme de manière objective ce qui ouvre la porte à toute espèce de contestation entre fournisseur et acheteur. Le défaut de forme est la distance maximale entre la surface réelle et une surface théorique en contact avec elle du côté extérieur de la matière. Selon la norme, la surface théorique doit être choisie de manière à minimiser cette distance. En métrologie tridimensionnelle, la détermination de cette surface théorique n'est pas facile. Les normes imposent de nombreux critères et les cas à traiter sont très diversifiés.

Dans ce contexte, nous proposons dans ce document intitulé : « Développement d'un logiciel pour la mesure des défauts de forme des pièces mécaniques - Planéité », de développer un outil d'aide au calcul du défaut de planéité des pièces mécaniques, intégrant les critères d'ajustements des moindres carrés et de Tchebychev (Minimax).

Le document est organisé en quatre parties :

- Le premier chapitre présentera la métrologie au marbre, les différentes spécifications géométriques d'un plan, les différentes tolérances géométriques normalisées et les différents types de contrôle.
- Le deuxième chapitre sera consacré à la métrologie tridimensionnelle. Nous présenterons les différents types de machines à mesurer tridimensionnelles (MMT), les modes de fonctionnement des systèmes de palpation et les différents types de palpeurs.
- Le troisième chapitre concernera les différents critères d'ajustement. Les critères définis par la norme ISO, à savoir, des moindres carrés, Tchebychev (Minimax),  $R_{\text{mini}}$  et  $R_{\text{maxi}}$ . Enfin, la modélisation mathématique sera détaillée.

- Le quatrième chapitre présentera les différents algorithmes qui ont servis à la programmation de notre logiciel (critère des moindres carrés et Tchebychev). Une étude comparative sera réalisée pour la vérification des résultats trouvés par notre logiciel GFDSOft et deux autres logiciels (expérimental et industriel). Pour sa validation, notre logiciel sera testé sur une étude de cas réels (pièces industrielles).

Enfin, le document se terminera par une conclusion générale et des perspectives.

Chapitre 1

# METROLOGIE AU MARBRE

## 1.1 Introduction

Dans le domaine de la mécanique et spécifiquement dans la métrologie, les pièces sont définies par un ensemble de spécifications géométriques portées sur un ou plusieurs dessins. Ces dessins sont les dessins d'ensemble, les dessins de définition, les dessins de fabrication...

Dans ce chapitre, nous allons définir la métrologie au marbre, les principales spécifications sur le plan et les applications de contrôle de la planéité sur les pièces manufacturées.

## 1.2 Métrologie

Le terme Métrologie vient du grec « Métrons », qui veut dire mesure et « logos », qui veut dire Science, la métrologie est donc la science de la mesure sur ses plans théorique et pratique [1].

La métrologie est l'ensemble des moyens techniques utilisés pour le contrôle dimensionnel des pièces.

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

## 1.3 Métrologie au marbre

La métrologie au marbre s'effectue principalement avec des comparateurs et des accessoires de métrologie (vé, équerre, cales étalons, piges, etc.). La colonne de mesure remplace aujourd'hui de plus en plus ces moyens de base, mais le principe d'utilisation reste sensiblement le même. Il faut également utiliser des micromètres extérieur ou intérieur pour mesurer par exemple le diamètre d'arbre ou d'alésages [2].

De nombreux contrôles nécessitent de déplacer soit le comparateur, soit la pièce sur le marbre. Les comparateurs s'emploient donc généralement avec une direction de mesure perpendiculaire au marbre pour permettre le balayage de la surface. Dans les autres cas, la mesure est ponctuelle ou nécessite des montages complexes [2].

Le marbre est un plan étalon en fonte ou en granit. Il a un très bon état de surface, sa planéité est presque parfaite. Il représente le plan de référence spécifié. Il est souvent préférable de déplacer le comparateur avec son support sur le marbre (bonne stabilité). Le déplacement de la pièce est voilée, la pièce est possible, mais dès que la face d'appui de la pièce voilée, la pièce boite et la mesure est très incertaine. Il faut aussi faire très attention aux déformations dues au bridage de la pièce [2].

Un comparateur mesure par une méthode différentielle (figure 1.1a) en comparant la pièce mesurée avec un étalon. Les comparateurs à levier sont utilisables dans les deux sens. Pour faire une mesure vers le haut, il faut également initialiser le comparateur vers le haut, par exemple en posant une cale sur la cale étalon (Figure 1.1b). L'incertitude de mesure sur le résultat comprend donc l'incertitude sur la mise à « 0 » et l'incertitude de la mesure de la pièce [2].

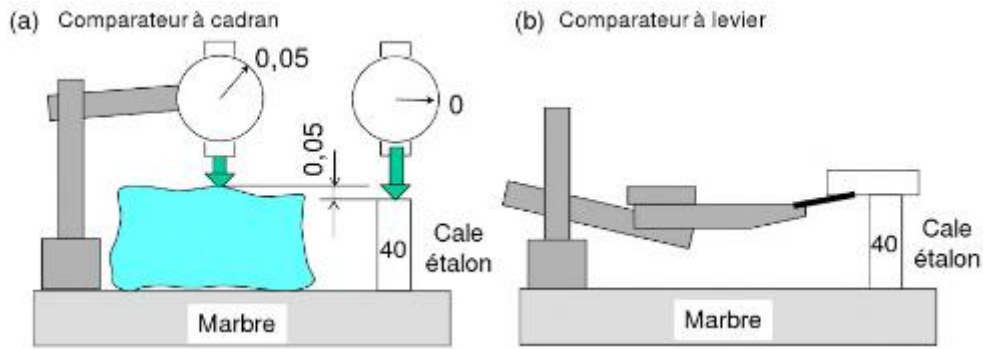


Figure 1.1 Mesure différentielle [2]

### 1.4 Mesure des principales spécifications sur le plan

Le concept de spécification géométrique des produits (Geometrical Product Specification) proposé par l'organisation internationale de normalisation (ISO) a pour but de fournir des normes cohérentes dans les domaines de la spécification et de la vérification de la géométrie des produits [3].

#### 1.4.1 Localisation d'un plan

L'écart de localisation est la distance de point éloigné à la surface nominale (figure 1.2).

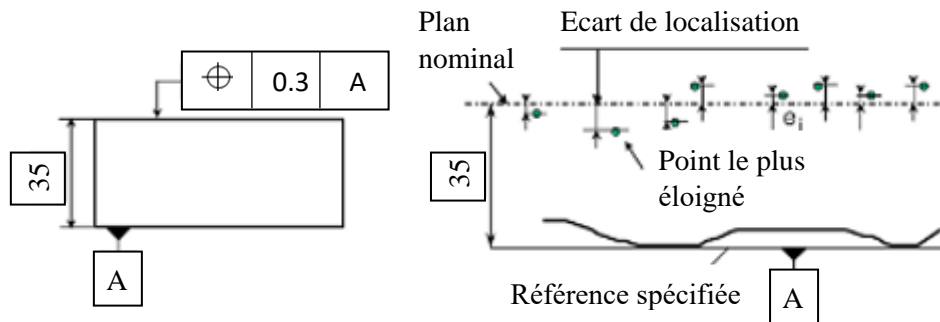


Figure 1.2 Mesure de la localisation [2]

L'étalonnage du comparateur au (0) est effectué sur une cale étalon de hauteur égale à la cote encadrée. La valeur lue au comparateur représente alors directement l'écart du point mesuré par rapport à la surface nominale (figure 1.3) [2].

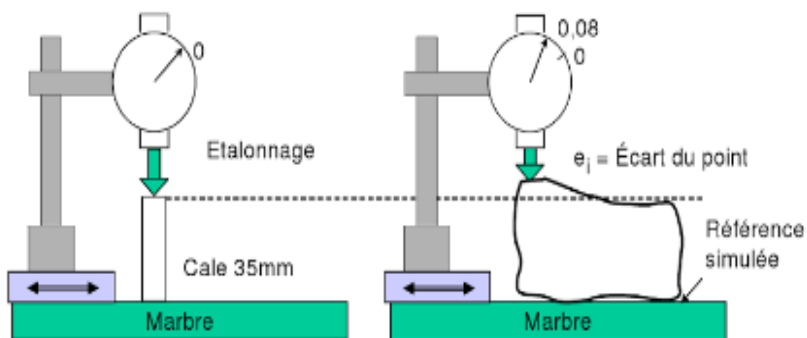


Figure 1.3 Méthode différentielle [2]

L'écart de localisation est :

$$e_L = \max|e_i|$$

### 1.4.2 Parallélisme d'un plan

L'écart de parallélisme est la largeur de la zone parallèle à la référence, la plus étroite possible et qui contient tous les points (figure 1.4).

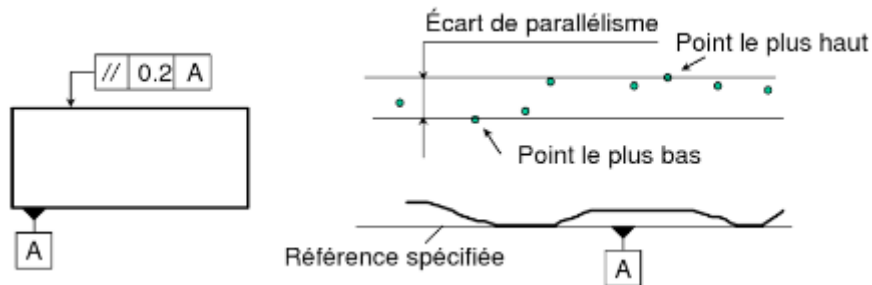


Figure 1.4 Mesure d'un parallélisme [2]

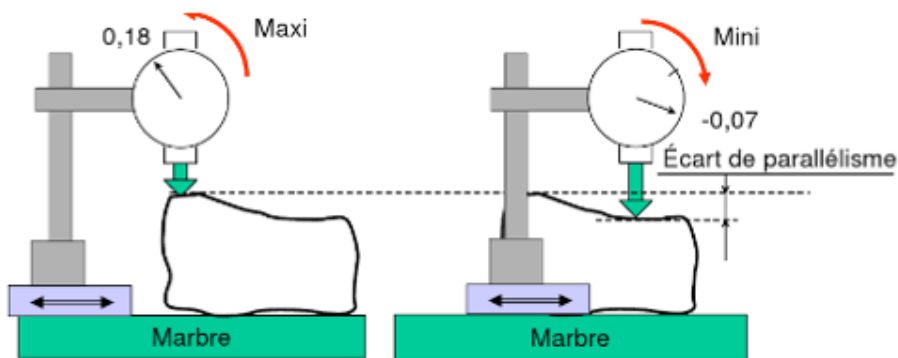


Figure 1.5 Mesure de la variation des écarts [2]

L'amplitude de la déviation du comparateur représente directement l'écart de parallélisme. Il n'y a pas besoin d'étalonner le comparateur (0). Si  $V_i$  est la valeur lue au comparateur, l'écart de parallélisme est directement :

$$e_P = \max(V_i) - \min(V_i)$$

### 1.4.3 Perpendicularité d'un plan

L'écart de perpendicularité est la largeur de la zone perpendiculaire à la référence, la plus étroite possible et qui contient tous les points de la surface spécifiée.

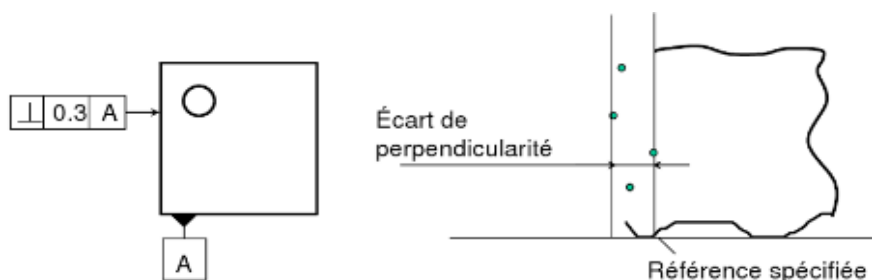


Figure 1.6 Perpendicularité du plan [2]



Le montage courant (figure 1.7) effectue le contrôle uniquement de la partie haute de la pièce en prenant appui sur la partie basse. Le comparateur fixe est placé à une hauteur qui correspond à l'extrémité de la pièce. La cale d'appui est fixée sur le pied magnétique. L'étalonnage au (0) est effectuée à l'aide d'une équerre placée contre la cale d'appui. La pièce est ensuite posée sur le marbre. L'écart lu au comparateur correspond à l'écart perpendicularité. Il faut faire glisser la pièce sur le marbre. Le long de la cale d'appui pour mesurer sur toute la largeur de la pièce [2].

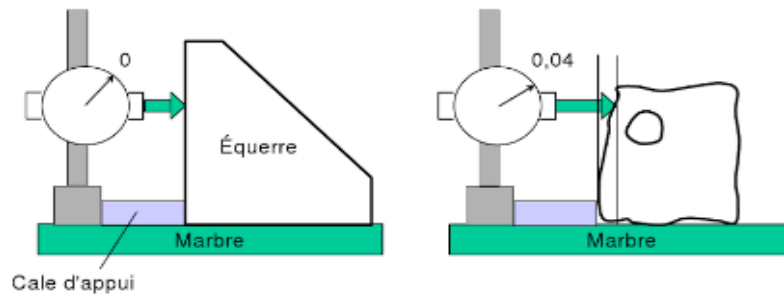


Figure 1.7 Mesure de la perpendicularité [2]

Cette méthode est très rapide, mais un creux ou bosse à mi-hauteur de la pièce n'est pas détectée. Elle est donc satisfaisante si l'écart de planéité est faible devant l'écart de perpendicularité.

Le montage (figure 1.8) permet de mesurer au mieux l'écart de perpendicularité sur toute la surface. Il utilise une équerre pour mettre le plan de référence perpendiculaire au marbre. Une cale permet de dégauchir la surface tolérancée parallèlement au marbre. L'amplitude de la déviation 10 comparateurs correspond à l'écart de perpendicularité [2].

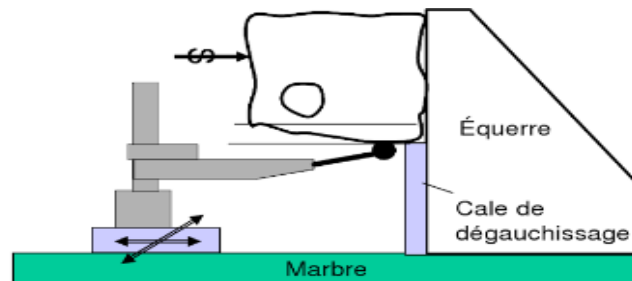


Figure 1.8 Mesure de la perpendicularité [2]

#### 1.4.4 Symétrie d'une rainure

L'écart de symétrie est la plus grande distance entre la surface médiane de la rainure par rapport au plan médian de référence.

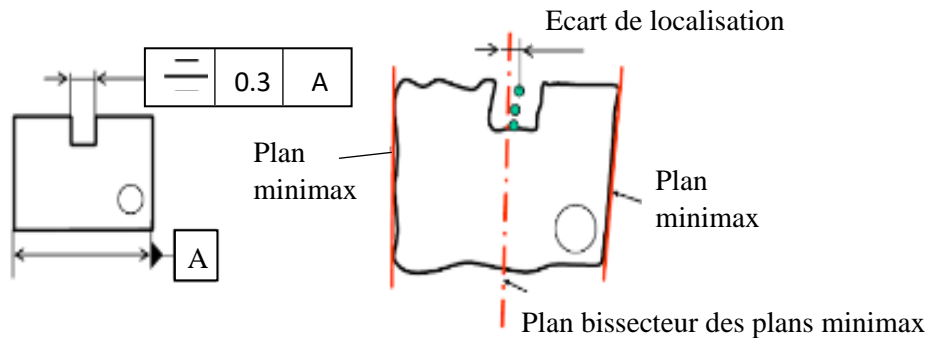


Figure 1.9 Définition de la symétrie [2]

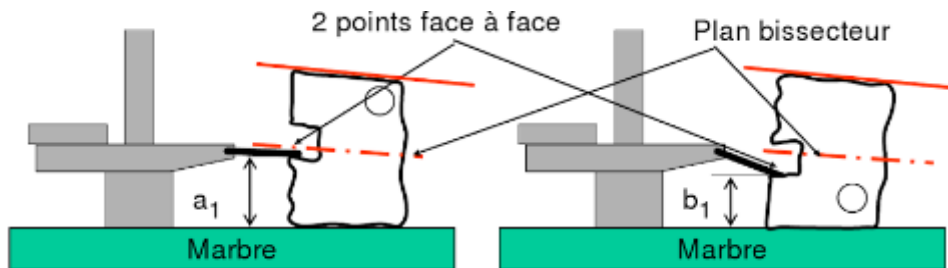


Figure 1.10 Mesure de la symétrie [2]

Le plan médian de référence est simulé par retournement sur un marbre. En effet, par retournement, ce plan de référence reste au même endroit (le plan bissecteur des plans minimax est à égale distance des plans minimax, donc du marbre). Il faut définir deux points face-à-face sur chaque côté de la rainure. La différence des Valeurs lues de chaque côté ( $a_i - b_i$ ) correspond au double de l'écart de symétrie du milieu du bipoint. Cette mesure est effectuée sur plusieurs couples de points le long de la rainure [2].

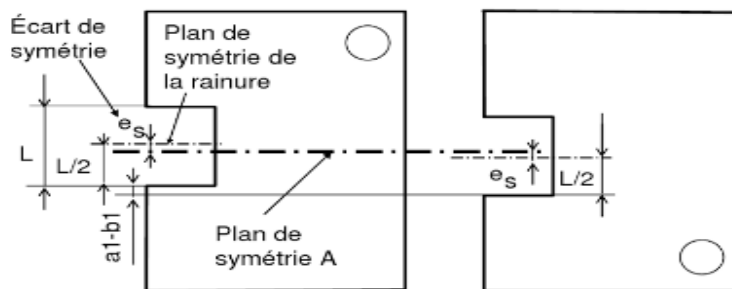


Figure 1.11 Calcul de la symétrie [2]

L'écart de symétrie est :

$$e_s = \max|a_i - b_i| / 2$$

### 1.4.5 Localisation d'un plan incliné

L'écart de la localisation est la distance du point le plus éloigné à la surface nominale.

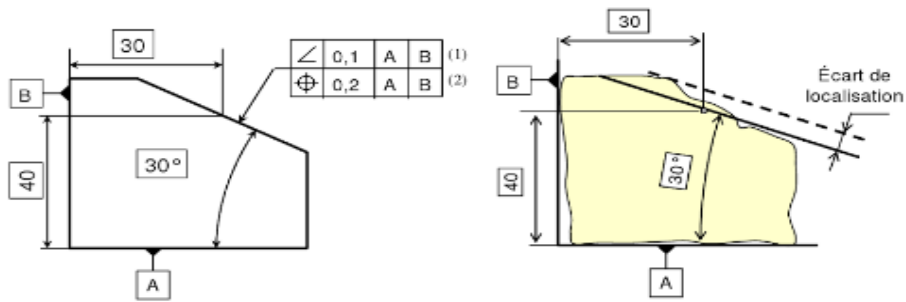


Figure 1.12 Position et inclinaison d'un plan incliné [2]

Le principe du contrôle consiste à incliner la pièce pour placer le comparateur dans la direction perpendiculaire au marbre. L'inclinaison est obtenue à l'aide d'une règle sinus. Il faut régler le (0) du comparateur sur le plan nominal à l'aide d'une pièce étalon ou d'un empilage de pige et de cales étalons. L'écart de localisation est :

$$e_L = \max|e_i|$$

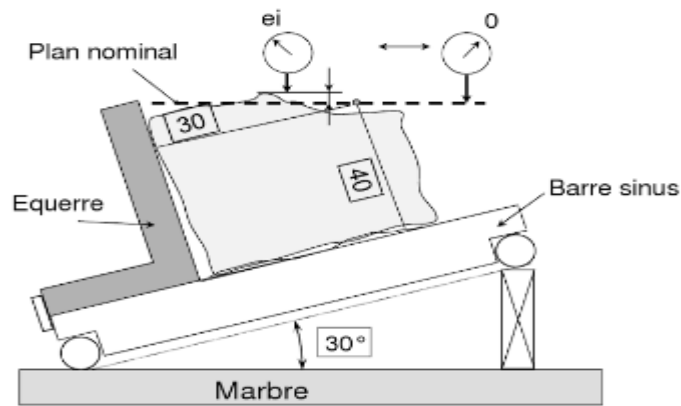


Figure 1.13 Mesure d'un plan incliné [2]

La figure 1.14 illustre l'étalonnage avec une pige. Il faut déterminer la hauteur de cale C, de telle sorte que le point de rebroussement sur la pige soit sur le plan nominal.

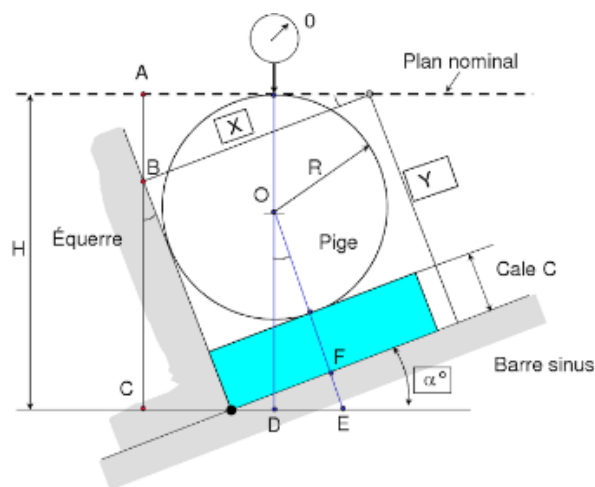


Figure 1.14 Mise à zéro du comparateur [2]

La hauteur de cale C est calculée en exprimant la hauteur H en fonction de X, Y et de l'angle  $\alpha$  :

$$C = X.tg\alpha + Y - R \left( \frac{1}{\cos\alpha} + 1 + tg\alpha \right)$$

#### 1.4.6 Orientation d'un plan incliné

Pour la spécification d'inclinaison de la figure 1.12, l'écart d'inclinaison et la largeur de la zone parallèle au plan nominal, la plus étroite possible et qui contient tous les points la mise en position de la pièce est la même que pour localisation. Pour une spécification d'orientation, il n'est pas nécessaire détalonner le comparateur au (0) [4].

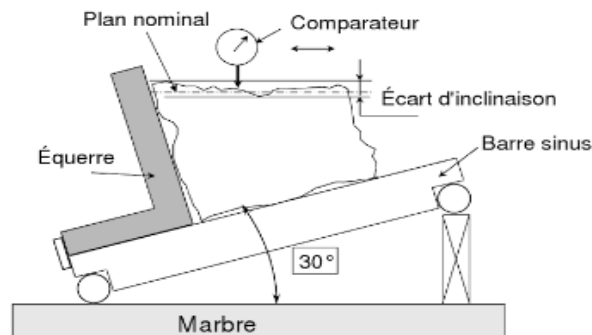


Figure 1.15 Mesure de l'inclinaison [2]

Si  $V_i$  est la valeur lue au comparateur, l'écart d'inclinaison est :

$$e_p = \max(V_i) - \min(V_i)$$

#### 1.4.7 Planéité d'un plan

La planéité est définie dans la norme ISO 1101 [5] comme étant l'écart minimal entre deux plans parallèles  $P_1$  et  $P_2$  contenant tous les points [6]. La surface sera acceptable si elle comprise entre les deux plans  $P_1$  et  $P_2$  distants de la tolérance (t mm), comme représenté par la figure 1.16.

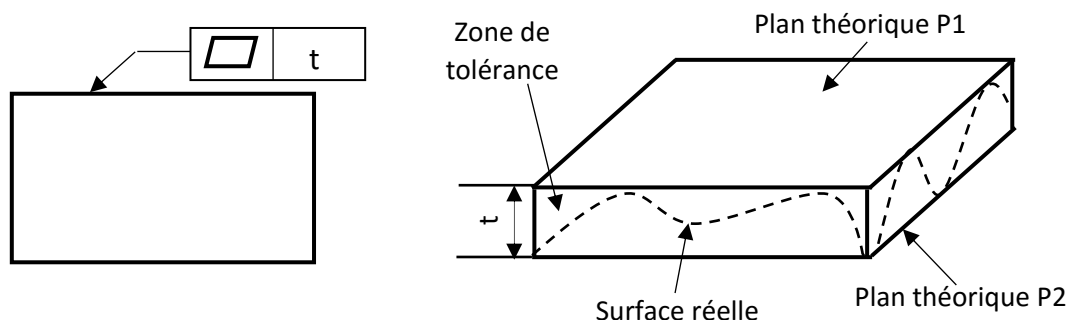


Figure 1.16 planéité d'un plan [7]

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 à contrôler, à l'aide d'une règle graduée et avec un stylo feutre, on trace des lignes droites sur laquelle on désigne des points équidistants, comme l'illustre la figure 1.17.

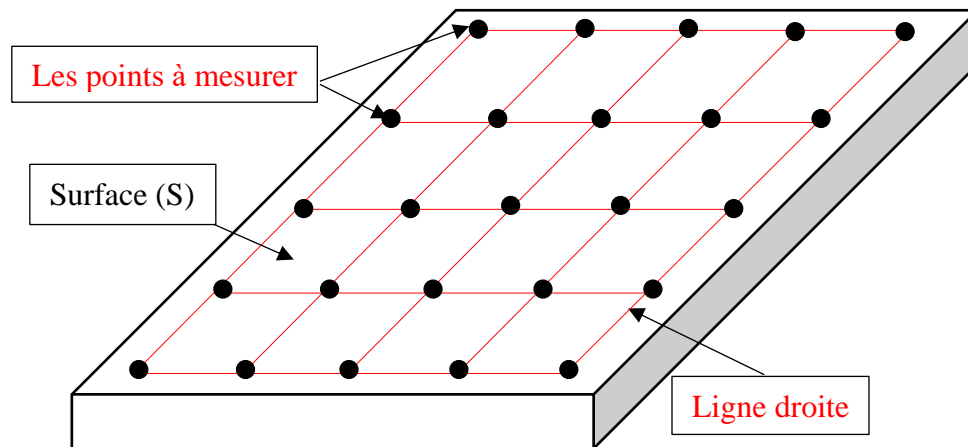


Figure 1.17 Désignation des points sur la surface (S) à contrôler

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 1.18.

Ensuite, on pose la pièce à contrôler 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.

La surface ABC est maintenant parallèle à la surface de référence du marbre ; elle définit ainsi la surface géométrique idéale nominale (ou initiale) de mesure.

Enfin, on palpe tous les 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 [8].

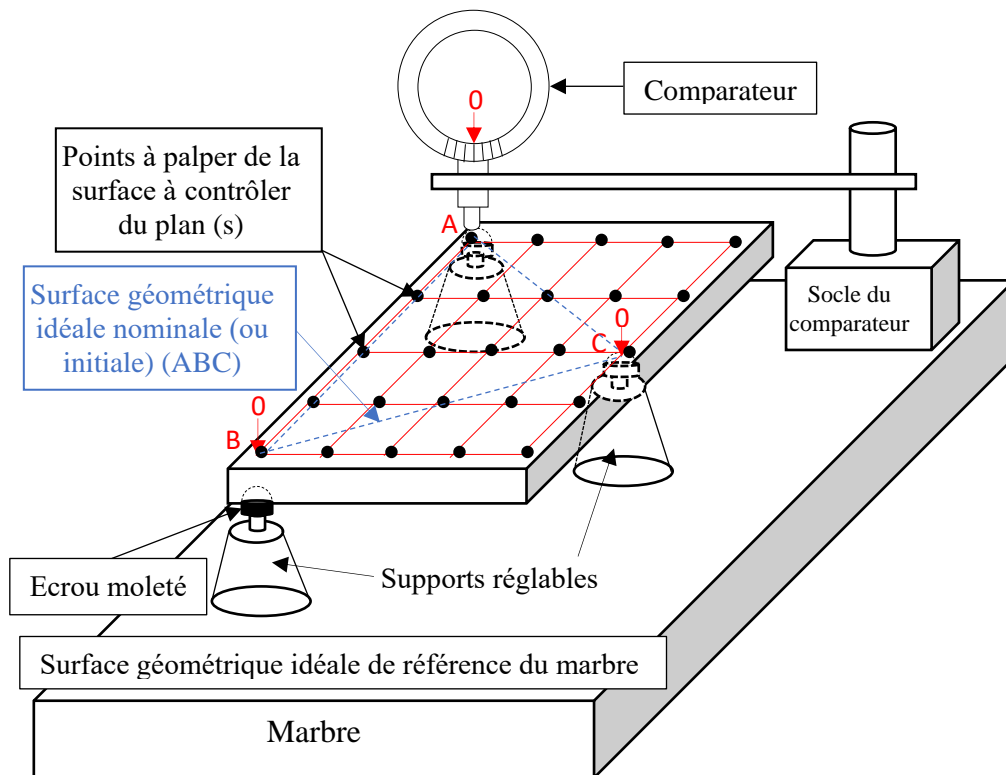


Figure 1.18 Contrôle de la planéité sur marbre de la surface (S) à contrôler

### 1.5 Zones de tolérances

Les zones de tolérance sont entièrement définies par les normes [ISO 1101], [ISO 1660], [ISO 2692], [ISO 3040], [ISO 5458]. Une zone de tolérance est un espace, de nature volumique ou surfacique, limité par un ou plusieurs éléments idéaux, de nature surfacique ou linéique.

Dans le cas d'un groupe d'éléments tolérancés, la zone de tolérance est décomposable en plusieurs zones de tolérances, chacune relative à un élément du groupe.

Une zone relative à un élément tolérancé est caractérisée par une valeur limite qui est selon les cas appelée, la valeur de la tolérance ( $t$ ) de la spécification ou la dimension limite ( $d$ ) de l'élément tolérancé [9].

### 1.6 Classification des tolérances géométriques

Les tolérances géométriques sont classifiées en fonction de la nature des contraintes géométriques qui peuvent être imposées en orientation et en position entre les éléments de situation de la zone de tolérance et la ou les références spécifiées [10].

On peut distinguer ainsi :

#### 1.6.1 Tolérances de forme

Les spécifications de formes se rapportent à des éléments géométriques qui peuvent être linéaires ou surfaciques. Elles indiquent un espace à l'intérieur duquel doit se trouver la totalité de l'élément réel concerné, cet espace peut être un espace plan (en deux dimensions) ou un espace volumique (en trois dimensions) [11].

L'information doit indiquer la largeur de cet espace et la forme de ses limites. La norme ISO 1101 [12] indique le code d'écriture utilisé pour préciser cette spécification [11].

**1.6.2 Tolérances d'orientation** qui imposent une contrainte d'orientation entre les éléments géométriques de situation de la zone de tolérance et ceux des références spécifiées.

**1.6.3 Tolérances de position** qui imposent une contrainte de position entre les éléments géométriques de situation de la zone de tolérance et ceux des références spécifiées. Sauf dans le cas (particulier) d'une tolérance de localisation d'une collection d'éléments tolérancés, sans références spécifiées où la zone de tolérance peut s'adapter librement aux éléments tolérancés [13].

**1.6.4 Tolérances de battement** qui sont de nature légèrement différente des tolérances de forme, d'orientation et de position, car elles relient de façon particulière les aspects forme, orientation et position.

Les tableaux ci-dessous donnent le nom, la représentation symbolique et les contraintes géométriques sur les zones de tolérances des tolérances géométriques [10].

Tableau 1.1 Tolérances géométriques normalisées de forme [10]

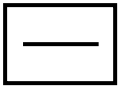

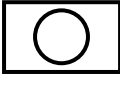

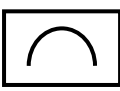

| Caractéristiques tolérancées et indication dans la 1 <sup>re</sup> case du cadre de tolérance | Élément tolérancé   | Zone de tolérance                                 |  |   |
|---|---|---|--|---|
|   |   | Contraintes par rapport aux références spécifiées | Forme et taille (valeur de la tolérance) |   |
| <b>Tolérance de forme</b>   |   |   |  |   |
| rectitude   |  | ligne   | sans                                     | $\varnothing$ d'un cylindre ou distance entre 2 droites ou 2 plans  |
| planéité  |  | plan  | sans                                     | distance entre 2 plans parallèles   |
| circularité   |  | ligne   | sans                                     | distance entre 2 cercles concentriques de diamètres variables   |
| cylindricité  |  | cylindre  | sans                                     | distance entre 2 cylindres coaxiaux de diamètres variables  |
| profil d'une ligne  |  | ligne   | sans                                     | distance euclidienne t, entre 2 lignes enveloppes des cercles de diamètre $\varnothing_t$ centrés sur une ligne plane théoriquement exacte. |
| Profil d'une surface  |  | surface   | sans                                     | Distance euclidienne t, entre 2 surfaces enveloppes des sphères de diamètre $\varnothing_t$ centrées sur une surface théoriquement exacte.  |

Tableau 1.2 Tolérances géométriques normalisées d'orientation [10]





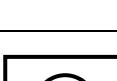



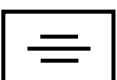
| Caractéristiques tolérancées et indication dans la 1 <sup>re</sup> case du cadre de tolérance | Élément tolérancé  | Zone de tolérance                                 |  |  |
|---|--|---|--|--|
|   |  | Contraintes par rapport aux références spécifiées | Forme et taille (valeur de la tolérance)     |  |
| <b>Tolérance d'orientation</b>  |  |   |  |  |
| parallélisme  |   | Ligne surface                                     | orientation                                  | Ø d'un cylindre ou distance entre 2 droites ou 2 plans parallèles  |
| Perpendicularité  |   | Ligne surface                                     | orientation                                  | Ø d'un cylindre ou distance entre 2 droites ou 2 plans parallèles  |
| Inclinaison   |   | Ligne surface                                     | orientation                                  | Ø d'un cylindre ou distance entre 2 droites ou 2 plans parallèles  |
| Profil d'une ligne  |   | Ligne   | Orienta- tion avec l'indication particulière | distance euclidienne t, entre 2 lignes enveloppes des cercles de diamètre Øt centrés sur une ligne plane théoriquement exacte. |
| profil d'une surface  |  | surface   | Orienta- tion avec l'indication particulière | distance euclidienne t, entre 2 lignes enveloppes des cercles de diamètre Øt centrés sur une ligne plane théoriquement exacte. |

Tableau 1.3 Tolérances géométriques normalisées de position [10]

| Caractéristiques tolérancées et indication dans la 1 <sup>re</sup> case du cadre de tolérance | Élément tolérancé   | Zone de tolérance                                 |  |  |
|---|---|---|--|--|
|   |   | Contraintes par rapport aux références spécifiées | Forme et taille (valeur de la tolérance) |  |
| <b>Tolérance de position</b>  |   |   |  |  |
| Localisation  |  | Point, ligne surface                              | Sans ou orientation et position          | Ø d'un cercle ou d'un cylindre ou distance entre 2 droites ou 2 plans parallèles |
| Concentricité   |  | point   | position                                 | Ø d'un cercle  |
| Coaxialité  |  | Ligne   | Orienta- tion et position                | Ø d'un cylindre  |
| Symétrie  |  | Ligne surface                                     | Orienta- tion et position                | distance entre 2 droites ou 2 plans parallèles                                   |



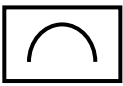


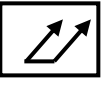
|                      |   |         |                         |   |
|----------------------|---|---------|-------------------------|---|
| profil d'une ligne   |  | ligne   | Orientation et position | distance euclidienne t, entre 2 lignes enveloppes des cercles de diamètre $\varnothing t$ centrés sur une ligne plane théoriquement exacte. |
| Profil d'une surface |  | surface | Orientation et position | distance euclidienne t, entre 2 lignes enveloppes des cercles de diamètre $\varnothing t$ centrés sur une ligne plane théoriquement exacte. |

Tableau 1.4 Tolérances géométriques normalisées de battement [10]

| Caractéristiques tolérancées et indication dans la 1 <sup>re</sup> case du cadre de tolérance | Élément tolérancé   | Zone de tolérance                                 |  |                         |
|---|---|---|--|-------------------------|
|   |   | Contraintes par rapport aux références spécifiées | Forme et taille (valeur de la tolérance) |                         |
| Tolérance de battement  |   |   |  |                         |
| Battement circulaire  |   | Ligne   | Orientation et position                  | distance entre 2 lignes |
| Battement total   |  | surface   | Orientation et position                  | distance entre 2 lignes |

## 1.7 Remarques sur les différentes tolérances proposées par la normalisation

### 1.7.1 Tolérances de forme

Les tolérances de rectitude et de planéité sont respectivement des cas particuliers des tolérances de forme du profil d'une ligne et d'une surface. En conséquence, les lignes réputées rectilignes et les surfaces réputées planes devront toujours utiliser leurs symboles spécifiques de tolérance de forme de rectitude et de planéité.

Par contre les tolérances de circularité et de cylindricité ne sont pas exactement des cas particuliers des tolérances de forme du profil d'une ligne et d'une surface. En effet les deux cercles concentriques ou les deux cylindres coaxiaux délimitant la zone de tolérance, ont leurs diamètres variables dans les cas de la circularité ou de la cylindricité, et fixes dans le cas des tolérances de forme du profil d'une ligne et d'une surface (le diamètre nominal de la zone de tolérance doit être dans ce cas indiqué par une dimension encadrée). En conséquence, les lignes réputées circulaires et les surfaces réputées cylindriques, pourront utiliser aussi bien des tolérances de circularité, de cylindricité que des tolérances de forme du profil d'une ligne ou d'une surface [10].

Les tolérances de profil d'une surface, avec ou sans référence spécifiée, seront systématiquement utilisées pour spécifier des surfaces coniques.

### ***1.7.2 Tolérance d'orientation***

Les tolérances de parallélisme et de perpendicularité sont des cas particuliers de la tolérance d'inclinaison.

En conséquence dans les cas où l'angle d'inclinaison est implicitement de 0° ou de 90°, la tolérance d'orientation devra toujours utiliser le symbole spécifique de parallélisme ou de perpendicularité [10], [13].

### ***1.7.3 Tolérance de position***

Les tolérances de concentricité, de coaxialité et de symétrie sont des cas particuliers de la tolérance de localisation où la distance entre les éléments de situation de la zone de tolérance et de la référence spécifiée est nulle. Dans ce cas, il sera alors nécessaire d'utiliser uniquement le symbole spécifique correspondant. La tolérance de localisation est réservée aux éléments de type plan, droit ou point [10], [13].

### ***1.7.4 Tolérance de battement***

Les tolérances de battement peuvent, suivant les cas, être équivalentes à des tolérances d'orientation ou de position [10].

## **1.8 Différents types de contrôle**

Dans une entreprise, la fabrication d'un produit passe par trois types de contrôle :

### ***1.8.1 Contrôle de réception***

Les matières premières entrant dans la fabrication du produit obéissent dès leur réception à des contrôles de conformité de leurs caractéristiques à celles prescrites dans les contrats d'achat entre l'acquéreur et le fournisseur.

Cette vérification peut se faire par des vérifications visuelles, des mesures ou des analyses au laboratoire [1].

### ***1.8.2 Contrôle en cours de fabrication***

D'une part, pour garantir une bonne qualité du produit final, la fabrication de chaque élément constituant ce produit doit obéir à un contrôle sévère ; d'autre part, ce contrôle nécessite des moyens matériels et humain important, c'est pourquoi et en vue de limiter le temps, le matériel et le personnel alloués aux processus de mesures en cours de fabrication, il y a eu l'élaboration de vérificateurs à limites (calibres à limites) [1].

### ***1.8.3 Contrôle final***

En plus de la vérification du montage correct des différents éléments, il y a lieu de faire des tests de fonctionnalité sur le produit final en choisissant l'environnement qui se rapproche au mieux à celui de son utilisation par le public [1].

## 1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la métrologie en générale. Elle permet de mesurer les défauts d'une pièce en donnant les réponses sous les formes suivantes :

- le contrôle consiste à dire si une pièce est conforme ou non à une spécification ;
- la mesure consiste à donner la valeur du défaut ou de l'écart d'une pièce qui correspond à une spécification ;
- l'identification consiste à donner des caractéristiques détaillées d'une surface ou de la position relative de surface.

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

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

## Chapitre 2

# **MESURE SUR MACHINE A MESURER TRIDIMENSIONNELLE**

## 2.1 Introduction

Les moyens de mesure classiques sont aujourd'hui complétés par les techniques de mesure tridimensionnelles qui permettent d'accéder à la géométrie des pièces complexes avec une grande précision et une grande rapidité. Les machines à mesurer tridimensionnelle (MMT) sont des machines utilisées en métrologie dimensionnelle. Elles permettent d'obtenir les coordonnées des points mesurés (palpés) sur une pièce mécanique.

Dans ce chapitre, nous allons aborder la définition de la machine à mesurer tridimensionnelle et ses différents types (portique, col de cygne et pont mobile), ainsi que le processus de mesure à partir de cette machine.

## 2.2. 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".

La notion de machine à mesurer apparaît dès le début du vingtième siècle, avec, par exemple, la « MUL » (machine à mesurer universelle linéaire) introduite par SIP en 1909 qui est donc une machine unidimensionnelle. Les premières machines à mesurer tridimensionnelles (MMT) [14] apparaissent dans les années 1960. On peut probablement écrire que la première MMT moderne est l'UMM500 de ZEISS apparue en 1973, elle est dotée d'un palpeur mesurant. La même année, RENISHAW introduisait le TP1, premier palpeur à déclenchement.

Dans les grandes lignes, la typologie et la conception des machines à mesurer tridimensionnelles ont été fixées dès le début des années 1980. Le type le plus courant à cette époque est la machine à portique (ISO10360-1) constituée d'éléments en granit guidés par des patins aérostatiques [17].

## 2.3 Machine à mesurer tridimensionnelle

Les machines à mesurer tridimensionnelles permettent de mesurer des pièces placées sur un marbre généralement avec un palpeur à contact. Pour cela, la machine possède trois axes X, Y et Z équipés de règles de mesure incrémentales de précision (figure 2.1). Une électronique, généralement intégrée dans un PC, permet de connaître à chaque instant la position de la tête de mesure dans le repère machine. Lorsque le palpeur touche la pièce la position de machine est enregistrée dans le logiciel de traitement [2], [15], [16].

Un repère mesure est ensuite défini avec les axes machines et une origine identifiée sur une sphère de calibrage posée sur le marbre. Tous les points palpés sur la pièce sont alors connus dans ce repère de mesure. Les coordonnées des points sont ensuite traitées par le logiciel de métrologie selon une gamme de mesure préparée par le métrologue [2], [15], [16].

Le palpeur peut être déplacé à la main (machine manuelle) avec une manette (machine motorisée) ou par l'intermédiaire d'un programme de palpage (machine motorisée numérique).

Les machines courantes permettent de mesure des pièces rentrant dans un cube de 300 à 600 mm de côté. Certaines machines à portique ou à trusquin peuvent atteindre 10 à 20 m de long.

Pour obtenir précision requise les machines à mesurer sont placées en salle de métrologie dans un local climatisé à 20° hygrométrie contrôlée. Les machines placées en atelier sont soumises à d'importantes perturbations. Elles sont moins précises [2].

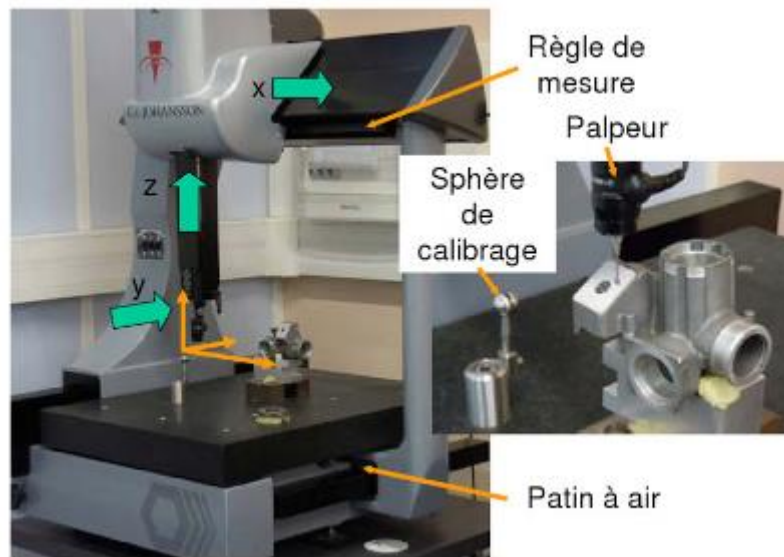


Figure 2.1. Machine à mesure tridimensionnelle [2]

Pour obtenir la précision. Les guidages sont réalisés directement sur des glissières un marbre avec des patins à air qui offrent une très grande raideur avec un effort de glissement très faible. Les machines moins précises se contentent de glissières métalliques avec des guidages à rouleaux. Les règles de mesures sont généralement des règles incrémentales de haute résolution permettant une mesure avec une résolution 2,05µm. La précision des machines est donnée suivant la norme VDI 2617 par des formules du type :

- Précision suivant un axe :  $2,5 + (L/400) \mu\text{m}$  (L étant la longueur mesurée) ;
- Précision dans le volume :  $3,0 + (L/350) \mu\text{m}$ .

Ces valeurs, données par les constructeurs, sont généralement très optimistes. Pour garantir la précision et obtenir une certification des mesurés, il faut faire régulièrement une calibration de la machine [2].

## 2.4 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 [17].

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 microdéformations 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 [8].

## 2.5 Différents types de machines à mesure tridimensionnelle

Il en existe de différents types qui sont fonction de la morphologie des pièces à mesurer, des précisions à atteindre, de la facilité d'utilisation etc. nous allons prendre trois types : portique, pont mobile et col de cygne.

### 2.5.1 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) (figure 2.2) [8], [18].



Figure 2.2 MMT de type portique [19]

### 2.5.2 Machine de type col de cygne

C'est la configuration la plus ancienne voir la figure 2.3. La charge est limitée et les courbes suivant les axes y et z restent faibles du fait des porte-à-faux [8].



Figure 2.3 MMT de type col de cygne [19]

### 2.5.3 Machine de type pont mobile

La machine de type pont mobile a une 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 (figure 2.4) [8].



Figure 2.4 MMT de type pont mobile [19]



## 2.6 Différents types de palpeurs

### 2.6.1 Palpeurs à contact (à déclenchement)

Les palpeurs à déclenchement sont les plus courants. Ils sont constitués d'un capteur associé à un stylet au bout duquel se situe une sphère (généralement une bille de rubis). Le palpéage consiste à venir toucher la pièce avec la bille en maintenant une vitesse d'avance constante. Le contact entre la bille et la pièce provoque la lecture et l'enregistrement de la position des axes de la machine, ce qui permet d'en déduire les coordonnées du point mesuré... [20].

Le palpeur à déclenchement est donc utilisé pour des mesures discrètes. Sa fiabilité repose sur la détection du moment précis où s'établit le contact entre la bille et la pièce. Pour cela, il existe trois technologies différentes. Le principe résistif est le plus courant et le plus simple. Un courant électrique circule à travers les points de contact de l'équipage mobile solidaire du stylet. Le déplacement du stylet lorsqu'il touche la pièce provoque une diminution de la surface de contact, et donc une atténuation du courant électrique. En le mesurant, on détecte alors le contact entre la pièce et le palpeur [20].

#### 2.6.1.1 Caractéristiques métrologiques du palpeur à déclenchement

Le palpeur [21], 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 palpeur 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 palpeur. C'est donc de la qualité du palpeur que dépendent en premier lieu d'une part, la plus ou moins bonne concordance entre valeur mesurée et valeur vraie du mesurand, et d'autre part, les limites de l'incertitude sur la valeur mesurée.

#### 2.6.1.2 Système de palpéage dynamique

Le système de palpéage se compose d'un stylet monté sur le palpeur à déclenchement dynamique illustrée par la figure 2.5 lui-même connecté à la MMT utilisant une tête manuelle [8].



Figure 2.5 Palpeur à déclenchement dynamique [19]

### 2.6.1.3 Principe de fonctionnement

Le composant principal des palpeurs à déclenchement par contact Renishaw est l'appui cinématique que montre la figure 2.6. Il s'agit d'un mécanisme qui après déflexion du stylet repositionne celui-ci avec une très grande précision (répétabilité).

L'appui cinématique [22] 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.

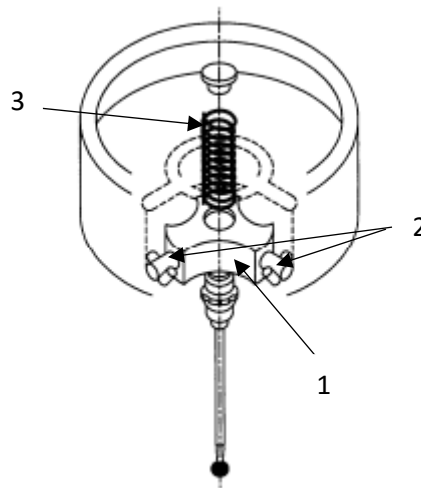


Figure 2.6 Appui cinématique [23]

### 2.6.1.4 Présentation des palpeurs

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

Le TP2 –5W : palpeur 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 palpeur a les mêmes caractéristiques que le palpeur TP6 avec en plus l'autojoint Renishaw (breveté) permettant de changer rapidement les palpeurs sans avoir besoin d'effectuer un nouvel étalonnage [8].

Le tableau.2.1 [24] donne les forces de déclenchement de réglage de ces palpeurs.

Tableau 2.1 Force de déclenchement [8]

| Palpeurs MMT | Longueur de stylet (type) | Force de déclenchement optimal (préréglée par Renishaw) | Palpage de réglage de la force de déclenchement |
|--------------|---------------------------|---|---|
| TP1 (S)      | 31 mm (PS1-1R)            | 15 g  | 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   |

### 2.6.2 Palpeurs à contact (mesurant)

Les palpeurs mesurant assurent une prise de points en continu. Ils sont donc généralement employés pour des applications de contrôle de forme ou de numérisation (notamment dans le domaine de l'outillage, dans la fabrication des moules, etc...). Le principe associe la mesure du déplacement des axes de la machine à celle de la déflexion du palpeur. Les palpeurs mesurant sont quatre à cinq fois plus chers que les palpeurs à déclenchement. Ils sont aussi plus encombrants et plus sensibles aux forces d'inertie. En revanche, ils sont plus précis pour l'analyse de formes, ils permettent d'acquérir rapidement une grande quantité de données et sont caractérisés, pour certains, par une faible force de contact (ce qui autorise le palpé de détails très fins) [20].



Figure 2.7 palpeur à mesure statique [25]

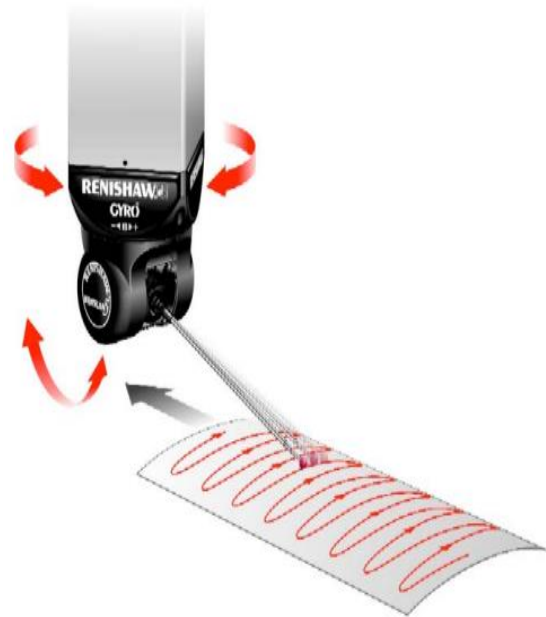


Figure 2.8 palpeur mesurant [25]

### 2.6.3 Palpeurs sans contact

Les palpeurs sans contact, dont l'emploi sur les machines à mesurer est plus récent que celui des palpeurs à déclenchement ou mesurant, sont le plus souvent basés sur des caméras CCD ou des palpeurs laser. La mesure est donc réalisée par une analyse d'images ou par triangulation laser. Dans tous les cas, les palpeurs sans contact offrent une vitesse de mesure élevée. Ils sont

ainsi utilisés pour numériser à grande vitesse des surfaces gauches, ou pour mesurer rapidement la forme de pièces de grandes dimensions (carrosseries automobiles notamment). De plus, comme il n'y a aucun contact entre le palpeur et la pièce, il est possible de réaliser des mesures sur des matériaux déformables, ou dans des endroits inaccessibles aux palpeurs traditionnels [20].



Figure 2.9 palpeur à fibre optique [25]

## 2.7 Processus de mesure

### 2.7.1 Principe

La mesure sur machine à mesurer tridimensionnelle nécessite six étapes. Elles sont illustrées par la figure 2.10.

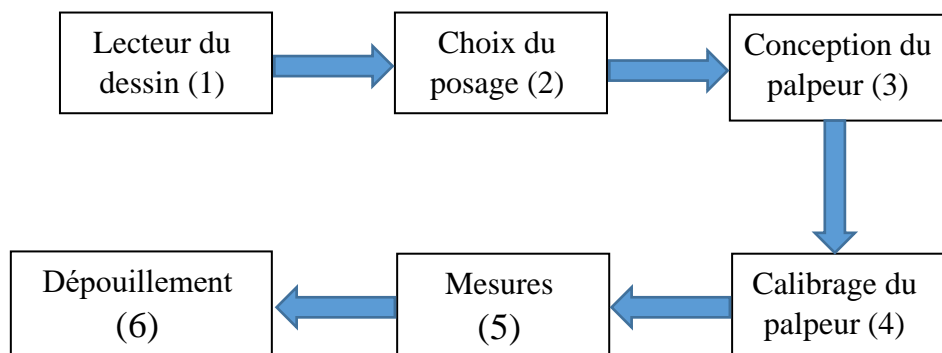


Figure 2.10 Processus de mesure

Notre travail, se situe à la sixième étape (dépouillement), c'est-à-dire, le calcul du défaut de forme (planéité).

### 2.7.2 Lecture du dessin

L'analyse du dessin de définition impose une bonne maîtrise du langage de cotation des normes ISO. Il faut identifier les surfaces tolérancées, déterminer la construction des systèmes de références et apprécier la précision requise pour chaque mesure [4].

### 2.7.3 Choix du posage

L'orientation de la pièce sur la machine doit rendre accessible les différentes surfaces à mesurer. La fixation de la pièce est très souvent assurée par de la pâte à modeler ou une bride en plastique en évitant la déformation de la pièce. Il faut éviter de mesurer en référence simulée, par exemple en palpant le marbre, il est préférable de palper directement les surfaces de références de la pièce [4].

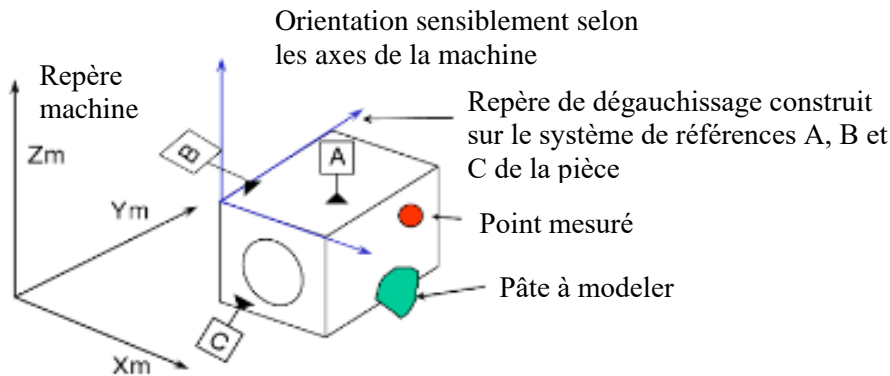


Figure 2.11 Mise en position de la pièce sur la machine [2]

En principe, la position de la pièce par rapport aux axes de la machine n'a aucune influence sur le résultat car les calculs se font dans des repères de dégauchissage attachés à la pièce. En pratique, la précision est meilleure lorsqu'elle ne fait intervenir qu'un seul déplacement de la machine. C'est pourquoi il est recommandé d'aligner les directions principales de la pièce à peu près selon les axes de la machine (à  $\pm 2^\circ$  près par exemple). Cette position permet également une vérification aisée de certaines mesures (vérification de la direction de la normale à un plan par exemple) [2].

### 2.7.4 Conception du palpeur

Le palpeur à déclenchement doit être conçu pour permettre l'accès aux différentes surfaces à mesurer. La touche sphérique ou cylindrique du palpeur est montée sur un support muni de trois contacts électriques (figure 2.12b). Dès que le palpeur touche la pièce, un des contacts électriques est rompu, le logiciel enregistre alors la position de chaque chariot.

Pour avoir accès à plusieurs surfaces, le palpeur peut avoir plusieurs touches éventuellement montée avec des rallonges (figure 2.12b). La touche est généralement sphérique ou cylindrique. Il existe également des palpeurs spécifiques, par exemple pour mesurer des gorges intérieures (figure 2.12c). Le palpeur peut aussi être orientable manuellement ou numériquement (figure 2.12d).

Sur machine à mesurer manuelle, on peut aussi utiliser des palpeurs rigides chroniques pour identifier l'axe de petits trous.

Il faut éviter autant que possible les palpeurs trop fins ou montés sur des rallonges trop longues qui manquent de rigidité [4].

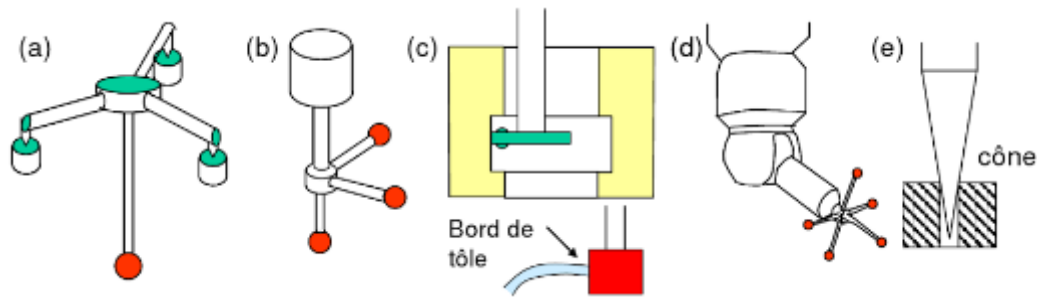


Figure 2.12 Palpeur de mesure [2]

### 2.7.5 Le calibrage

Lorsque le palpeur touche la surface à mesurer, n'est pas encore rompu. Il faut un petit déplacement supplémentaire de quelques microns pour faire basculer le palpeur et couper le contact. Ce petit déplacement correspond à l'angle de déclenchement (figure 2.13). L'effort appliqué par le ressort génère également une légère déformation de la tige. Pour prendre en compte ces phénomènes, le palpeur est calibré sur un étalon [2].

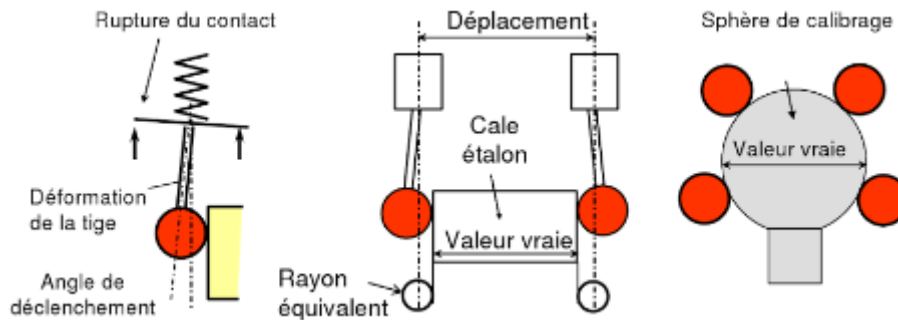


Figure 2.13 Calibrage du palpeur [2]

Dans son principe, le calibrage consiste à mesurer deux points opposés sur une cale étalon. La machine détermine le déplacement correspondant du chariot. Connaissant la dimension (vrai) de la cale, le calibrage détermine le rayon équivalent de la touche :

$$\text{Rayon équivalent touche} = (\text{déplacement} - \text{dimension vraie})/2$$

En réalité, il faut déterminer la position de la touche dans les trois directions pour cela, le calibrage est effectué sur une sphère de calibrage fixée le marbre (figure 2.14).

Pour un palpeur (étoile), le calibrage est effectué pour chaque touche, ce qui permet de définir les jauges de chaque touche et le rayon équivalent. Les mesures donnent les coordonnées du centre de la touche de palpation par rapport au repère mesure unique construit sur le centre de la sphère de calibrage [2].

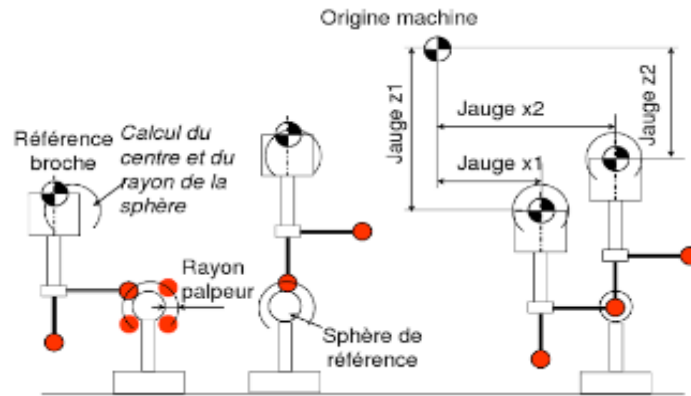


Figure 2.14 Calibrage d'un palpeur étoile [2]

### 2.7.6 Palpage et les constructions

Les mesures sont effectuées dans le repère mesure. Le temps moyen d'un palpement est de l'ordre de cinq secondes pour une machine courante à commande numérique, ce qui impose de limiter le nombre de points [4].

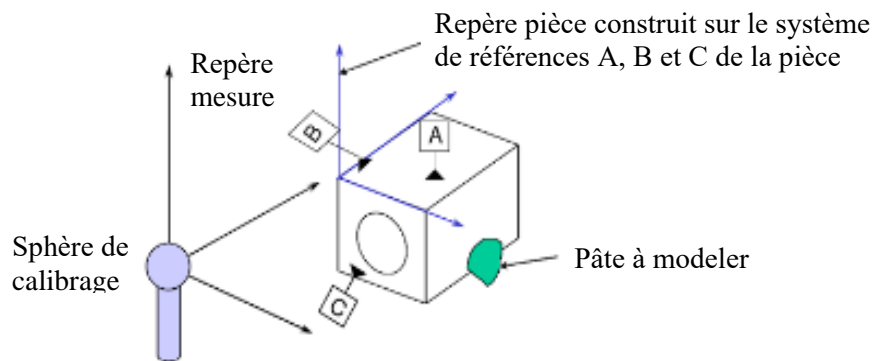


Figure 2.15 Repère pièce [2]

L'opérateur construit également des repères locaux souvent appelés des repères pièces ou des repères de dégauchissage (figure 2.15) à partir des systèmes de références imposés par la cotation des pièces. Les coordonnées des points et les caractéristiques des éléments géométriques peuvent être exprimées dans le repère mesure ou dans un repère pièce [2].

### 2.7.7 Dépouillement

Le dépouillement des mesures se fait l'aide d'un logiciel qui utilise différents algorithmes de calcul. Il permet également de visualiser la topologie des surfaces et d'établir un procès-verbal de mesure [2].

### 2.7.8 Mode opératoire

Le but est soit de valider la conformité de la pièce en dessin, soit de déterminer l'écart de chaque surface pour permettre aux fabricants d'améliorer les réglages des machines opératoire est donné par la figure 2.16. Il s'agit donc de mesurer les caractéristiques intrinsèque des surfaces (diamètre, forme, etc.), les positions relatives (angle, distance, etc.) et les écarts correspondant aux spécifications géométriques du dessin [2].

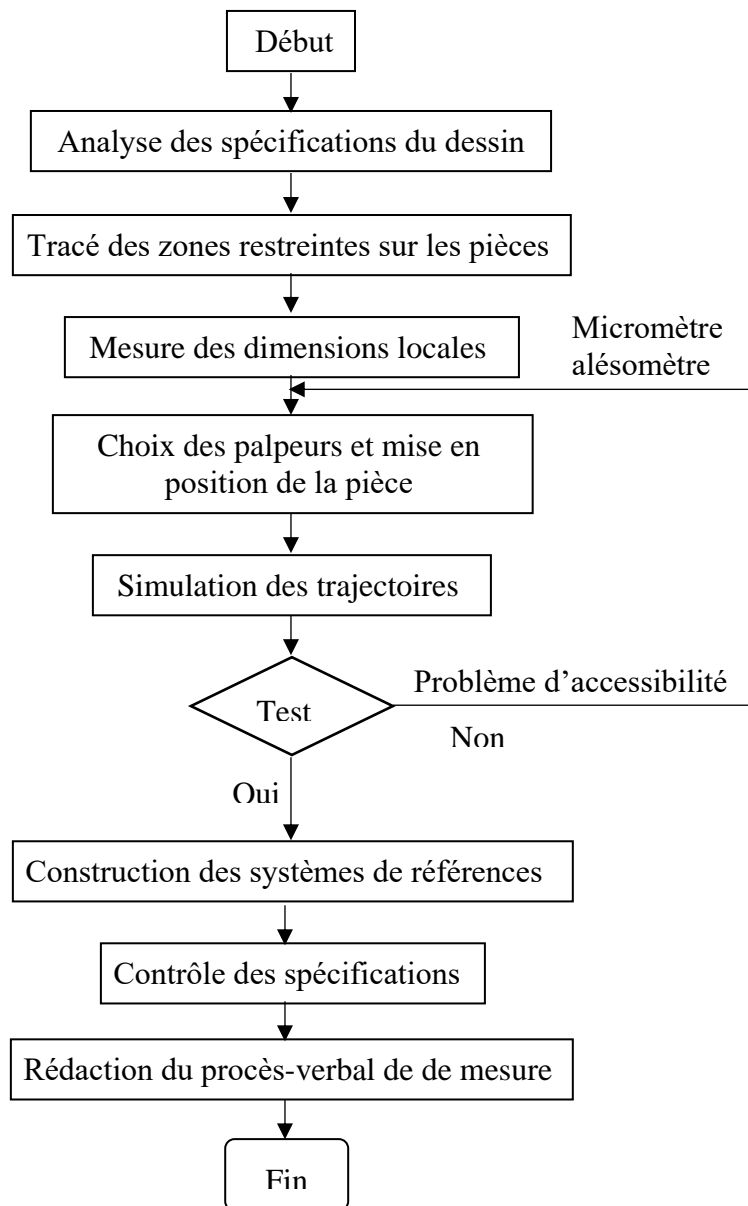


Figure 2.16 Mode opératoire de la gamme de mesure [2]

La mesure d'une spécification impose une procédure illustrée dans la figure 2.17 pour une localisation d'un plan :

- Palper huit points sur la face A à de référence (PLAN1) et associer le plan parfait selon le critère minimax ;
- Construire le PLAN 2, à 30 mm du PLAN1 ;
- Mesurer la localisation du PLAN 3 par rapport au PLAN2 en palpant huit points

Le logiciel donne l'écart de localisation qui est la plus grande distance des points palpés au PLAN2 [2].



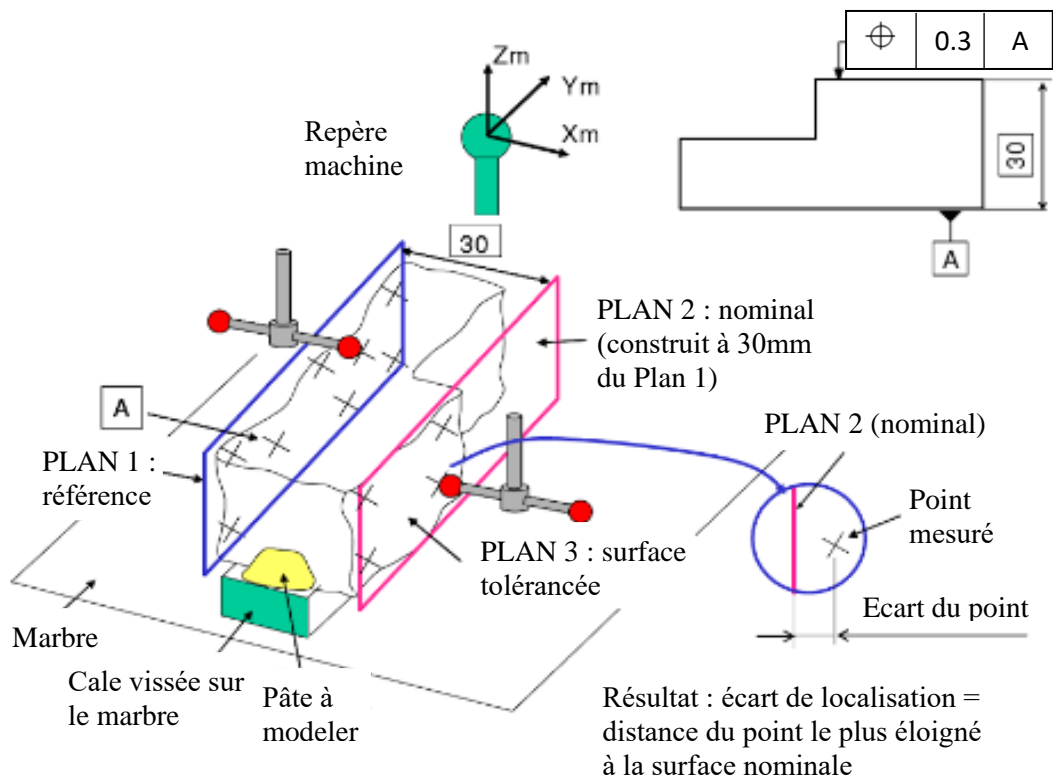


Figure 2.17 Ordre des opérations de mesure [2]

## 2.8 Conclusion

Ce chapitre montre l'importance prise par la mesure tridimensionnelle dans les systèmes de production et la nécessité d'en définir la meilleure qualité. Il est obligatoire de concevoir de nouvelles procédures et machines capables de faire des assouplissements complexes. MMT en raison de sa grande précision et la répétabilité des résultats de mesure a été pionnier dans les industries d'inspection. Cependant, MMT doit fournir les informations requises concernant les dimensions des pièces et les tolérances de manière efficace et efficiente. Il est essentiel que les utilisateurs de MMT comprennent et mettent en œuvre des procédures et des techniques correctes pour améliorer la fiabilité des résultats de mesure.

## Chapitre 3

# DIFFERENTS CRITERES D'AJUSTEMENTS

### 3.1 Introduction

Ce chapitre présente les différents critères d'ajustement, à savoir : Moindres carrés, Tchebychev, Rmini et Rmaxi. Le critère des moindres carrés est disponible dans les logiciels de la majorité des machines à mesurer tridimensionnelles. Le critère des moindres carrés est en général traité par un simple calcul matriciel. Dans ce chapitre nous allons développer cet algorithme, puis nous présenterons les différents modèles mathématiques et géométriques des autres algorithmes.

### 3.3 Critères normalisés

En métrologie tridimensionnelle, la détermination de surfaces théoriques n'est pas facile. Les normes imposent de nombreux critères, les cas à traiter sont très diversifiés, si bien qu'il est difficile d'obtenir des algorithmes génériques. De nombreux chercheurs ont proposés des méthodes, mais celles-ci sont souvent dédiées à un nombre limité de cas. Historiquement, le critère des moindres carrés a été le plus utilisé, car il peut être traité par un simple calcul matriciel. De nos jours le critère Minimax également appelé « Tchebychev » et le critère d'enveloppe (R mini ou R maxi) sont facilement accessibles à l'aide des solveurs [26].

#### 3.3.1 Critère des moindres carrés

##### 3.3.1.1 Historique

La méthode des moindres carrés, indépendamment élaborée par Legendre et Gauss au début du XIXe siècle [27], [28]. Gauss à l'âge de 18 ans, a conçu la méthode des moindres carrés (LS). Cependant, il ne l'a pas publié avant 1809 [29], [30]. La méthode des moindres carrés linéaires nécessite qu'une droite soit ajustée à un ensemble de points de données tel que la somme des carrés des écarts verticaux par rapport aux points à minimiser [31]. Au cours des dernières années, un effort a été fait pour trouver de meilleures méthodes d'ajustement des courbes ou des équations aux données, mais la méthode des moindres carrés est restée dominante et est utilisée comme méthode d'estimation des paramètres [32]. La méthode des moindres carrés consiste à trouver les paramètres qui minimisent une fonction objective particulière basée sur des écarts quadratiques [32], [33], [34].

##### 3.3.1.2 Association par le critère des moindres carrés

Le critère des moindres carrés consiste à calculer la somme  $S = \sum d_i^2$  et à rechercher la surface théorique associée qui minimise cette somme. La surface des moindres carrés passe « entre les points ». Les points réels sont de part et d'autre de la surface des moindres carrés. Le plan des moindres carrés passe par le centre de gravité G des points c'est-à-dire passe au milieu des points, comme le montre la figure 3.1 [2].

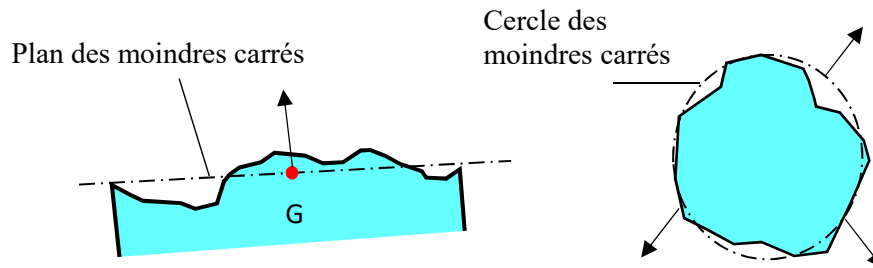


Figure 3.1 Plan et cercle des moindres carrés [2]

### 3.3.1.3 Critère des moindres carrés « tangent » :

La surface théorique avec le critère des moindres carrés tangent est obtenue en décalant la surface des moindres carrés pour la faire passer par le point le plus éloigné du côté libre de la matière (figure 3.2) :

- Pour un plan, le plan est parallèle au plan des moindres carrés et passe par le point d'écart mm maxi (le plus éloigné du côté libre de la matière) ;
- Pour un arbre, le cylindre est coaxial au cylindre des moindres carrés et passe par le point d'écart maxi (le plus éloigné de l'axe) ;
- Pour un alésage, le cylindre est coaxial au cylindre des moindres carrés et passe par le point d'écart maxi (le plus près de l'axe) [2] ;

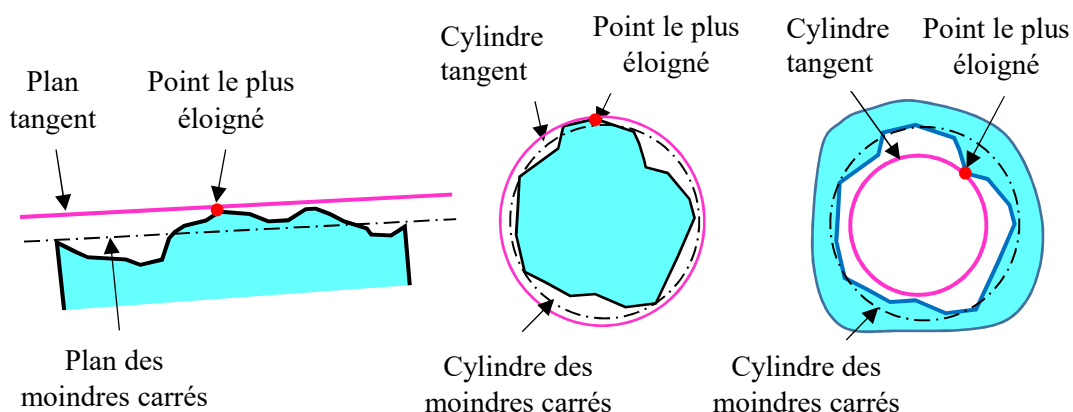


Figure 3.2 Surface des moindres carrés tangente [2]

### 3.3.1.4 Surface des moindres carrés décalée de la moitié du défaut de forme

La surface des moindres carrés est décalée de la moitié du défaut de forme calculé avec les moindres carrés (figure 3.3) :

- Pour un plan, le plan est parallèle au plan des moindres carrés décalé du côté libre de la matière de la moitié du défaut de planéité ;
- Pour un alésage, le cylindre est coaxial au cylindre des moindres carrés avec un rayon diminué de la moitié de l'écart de cylindricité ;
- Pour un arbre, le cylindre est coaxial au cylindre des moindres carrés avec un rayon augmenté de la moitié de l'écart de cylindricité ;

La surface « décalée est légèrement différente de la surface tangente », car la zone caractérisant le défaut de forme de la surface n'est pas forcément centrée sur la surface des moindres carrés [2].

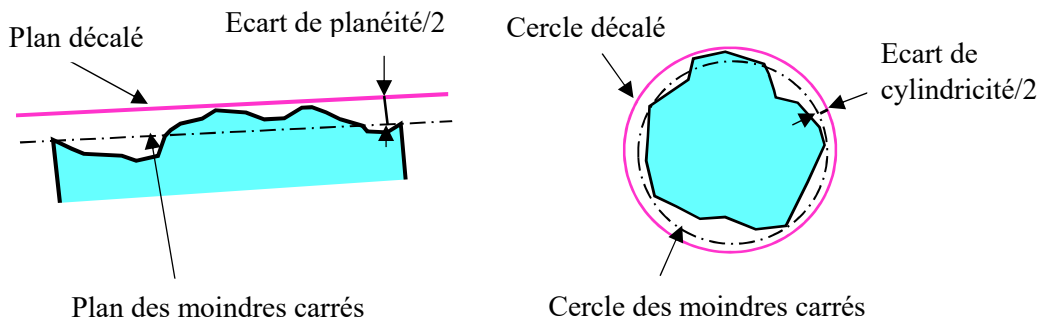


Figure 3.3 Surface des moindres carrés décalée [2]

### 3.3.2 Critère de Tchebychev (Minimax)

La surface Minimax est tangente côté libre de la matière et elle minimise la distance maxi. Il faut donc que tous les écarts soient négatifs ou nuls et  $\max |e_i|$  minimal (figure 3.4).

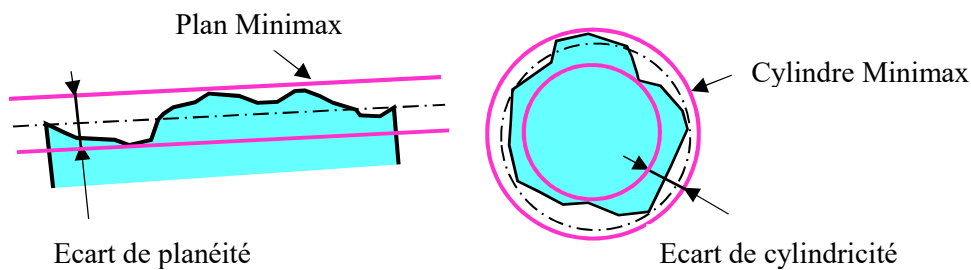


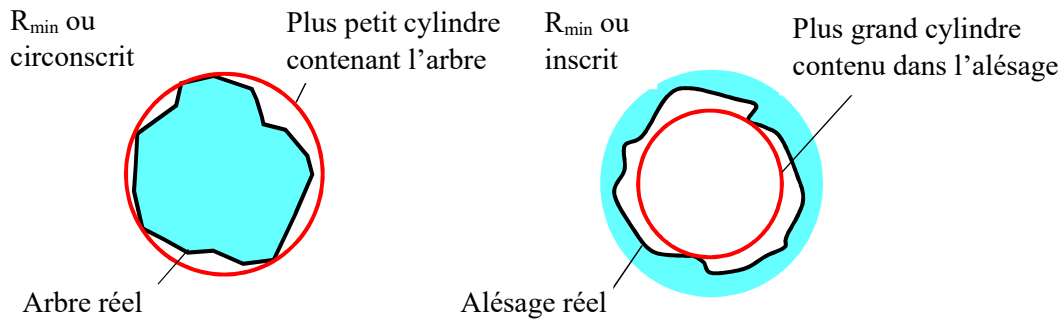
Figure 3.4 Surfaces Minimax [2]

Pour une surface plane, ce critère revient à déterminer deux plans parallèles dont la distance est minimale tout en contenant tous les points de la surface. Ces deux plans délimitent l'écart de planéité de la surface.

Pour le cylindre, il faut déterminer deux cylindres coaxiaux dont la différence des rayons est minimale tout en contenant tous les points de la surface. Ces deux cylindres délimitent l'écart de cylindricité de la surface [2].

### 3.3.3 Critère $R_{min}$ et $R_{max}$

Ce critère consiste à rechercher le plus petit cylindre contenant la surface réelle pour un arbre ( $R_{mini}$  ou circonscrit) ou le plus grand cylindre contenu dans la surface réelle pour un alésage ( $R_{maxi}$  ou inscrit) [2].

Figure 3.5 Critère  $R_{mini}$  et  $R_{maxi}$  [2]

### 3.4 Nombre de points nécessaire pour le critère des moindres carrés

La méthode des moindres carrés est utilisée par la plupart des MMT, elle nécessite le palpé de  $n \text{ points} + 1$ , avec  $n$  le nombre de points minimum pour définir l'élément géométrique parfait (3 pour un plan).

Tableau 3.1 Nombre minimal de points palpés

| Nom de l'élément géométrique | Nombre de points palpés minimal (n) |
|------------------------------|-------------------------------------|
| Droite associée              | 2                                   |
| Plan associée                | 3                                   |
| Cercle associée              | 3                                   |
| Sphère associée              | 4                                   |
| Cylindre associée            | 5                                   |
| Cône associée                | 6                                   |

### 3.5 Influence de la densité des points sur l'algorithme des moindres carrés

La figure 3.6 illustre l'identification de la droite des moindres carrés avec cinq points (en trait continu). Plusieurs autres points sont ajoutés au voisinage du point  $M_1$ . La droite des moindres carrés (en pointillé) est attirée par le paquet de points.

Avec la méthode des moindres carrés, il faut une répartition uniforme des points sur l'ensemble de la surface.

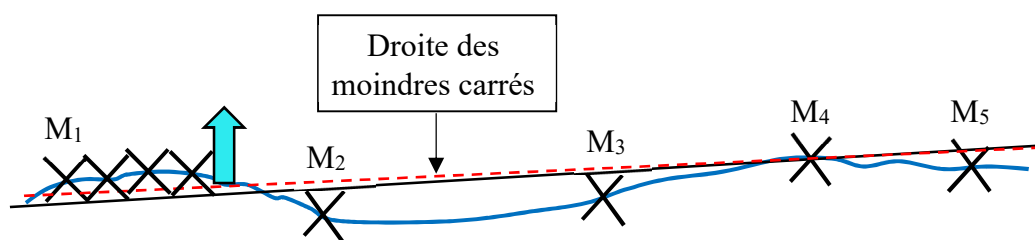


Figure 3.6 Influence de la densité de points

### 3.6 Identification le plan des moindres carrés

On cherche un plan qui approche au mieux un nuage de points  $(x_i, y_i, z_i)$  pour  $i = 1, \dots, n$ . On cherche donc une fonction affine :  $f(x, y) = Ax + By + C$ , tel que :

L'erreur  $e_i = |z_i - f(x_i, y_i)|$  soit « globalement » la plus faible possible. Comme précédemment, on va minimiser  $\sum_i e_i^2$  [35].

On se donne a priori « un plan non vertical »  $z = f(x, y) = Ax + By + C$  et on pose :

$$S = \sum e_i^2 = \sum (Z - AX - BY - C)^2 \quad (3.1)$$

La somme  $S$  dépend du plan  $f(x, y) = Ax + By + C$ , donné, i.e. qui dépend de  $A, B$  et  $C$ . Et le meilleur plan sera donné par un triplet  $(A, B, C)$  tel que  $S(A, B, C) = \min S(A', B', C')$ , i.e. la somme qui minimise le carré des erreurs. Donc, si  $(A, B, C)$  existe, on a :

$$\frac{\partial S}{\partial A}(A, B, C) = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial B}(A, B, C) = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial C}(A, B, C) = 0. \quad (3.2)$$

Les dérivées partielles sont les suivantes :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial A} = -2 \sum X(Z - AX - BY - C) \Leftrightarrow \sum XZ = A \sum X^2 + B \sum XY + C \sum X \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial B} = -2 \sum Y(Z - AX - BY - C) \Leftrightarrow \sum YZ = A \sum XY + B \sum Y^2 + C \sum Y \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial C} = -2 \sum (Z - AX - BY - C) \Leftrightarrow \sum Z = A \sum X + B \sum Y + nC \quad (3.5)$$

Avec  $n$  le nombre de valeurs

On obtient alors un système de 3 équations à 3 inconnues :

$$\sum XZ = A \sum X^2 + B \sum XY + C \sum X \quad (3.6)$$

$$\sum YZ = A \sum XY + B \sum Y^2 + C \sum Y \quad (3.7)$$

$$\sum Z = A \sum X + B \sum Y + nC \quad (3.8)$$

La forme matricielle est la suivante :

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

Pour résoudre ce système nous utilisons la méthode de Cramer :

Tout système de Cramer  $Ax = y$  possède une solution unique, qu'on peut calculer comme suit. On remplace la  $k$ -ième colonne de  $A$  par  $y$  et on la note  $A_k$  la matrice ainsi obtenue, pour  $k = 1, \dots, n$ . Alors la  $k$ -ième composante de la solution  $x$  est donnée par la formule suivante [36], [37] :

$$x_k = \frac{\det(A_k)}{\det(A)}, \quad k = 1, \dots, n. \quad (3.9)$$

Pour notre cas, nous allons utiliser les notations suivantes :

$$P = \begin{pmatrix} \sum X^2 & \sum YX & \sum X \\ \sum YX & \sum Y^2 & \sum Y \\ \sum X & \sum Y & n \end{pmatrix}, \quad Q = \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix}, \quad R = \begin{pmatrix} \sum XZ \\ \sum YZ \\ \sum Z \end{pmatrix}$$

Où  $P$  la matrice carrée, contient les coefficients des inconnues, le vecteur  $Q$  contient ces inconnues et le vecteur  $R$  contient les membres de droite des équations du système ; les coefficients et les inconnues font partie d'un même corps commutatif.

Le théorème affirme alors que le système admet une unique solution si et seulement si le déterminant de la matrice  $P$  est différent de zéro [38]. Cette solution est alors donnée par :

Calcul du coefficient  $A$  :

$$A = \frac{\det(P_1)}{\det(P)} \quad (3.10)$$

Où  $P_1$  est la matrice carrée formée en remplaçant la première colonne de  $P$  par le vecteur  $R$  :

$$A = \frac{\det(P_1)}{\det(P)} = \frac{\begin{vmatrix} \sum XZ & \sum YX & \sum X \\ \sum YZ & \sum Y^2 & \sum Y \\ \sum Z & \sum Y & n \end{vmatrix}}{\det(P)} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \det(P_1) &= \begin{vmatrix} \sum XZ & \sum YX & \sum X \\ \sum YZ & \sum Y^2 & \sum Y \\ \sum Z & \sum Y & n \end{vmatrix} \\ &= \sum XZ (n \sum Y^2 - (\sum Y)^2) - \sum YX (n \sum YZ - \sum Z \sum Y) + \sum X (\sum YZ \sum Y - \sum Z \sum Y^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \det(P) &= \begin{vmatrix} \sum X^2 & \sum YX & \sum X \\ \sum YX & \sum Y^2 & \sum Y \\ \sum X & \sum Y & n \end{vmatrix} \\ &= \sum X^2 (n \sum Y^2 - (\sum Y)^2) - \sum YX (n \sum YX - \sum X \sum Y) + \sum X (\sum YX \sum Y - \sum X \sum Y^2) \end{aligned}$$



$$A = \frac{\sum XZ (n \sum Y^2 - (\sum Y)^2) - \sum YX (n \sum YZ - \sum Z \sum Y) + \sum X (\sum YZ \sum Y - \sum Z \sum Y^2)}{\sum X^2 (n \sum Y^2 - (\sum Y)^2) - \sum YX (n \sum YX - \sum X \sum Y) + \sum X (\sum YX \sum Y - \sum X \sum Y^2)} \quad (3.12)$$

Calcul du coefficient  $B$  :

$$B = \frac{\det(P_2)}{\det(P)} \quad (3.13)$$

Où  $P_2$  est la matrice carrée formée en remplaçant la deuxième colonne de  $P$  par le vecteur  $R$  :

$$B = \frac{\det(P_2)}{\det(P)} = \frac{\begin{vmatrix} \sum X^2 & \sum XZ & \sum X \\ \sum YX & \sum YZ & \sum Y \\ \sum X & \sum Z & n \end{vmatrix}}{\det(P)} \quad (3.14)$$

$$\det(P_2) = \begin{vmatrix} \sum X^2 & \sum XZ & \sum X \\ \sum YX & \sum YZ & \sum Y \\ \sum X & \sum Z & n \end{vmatrix}$$

$$= \sum X^2 (n \sum YZ - \sum Y \sum Z) - \sum XZ (n \sum YX - \sum X \sum Y) + \sum X (\sum YX \sum Z - \sum X \sum YZ)$$

$$B = \frac{\sum X^2 (n \sum YZ - \sum Y \sum Z) - \sum XZ (n \sum YX - \sum X \sum Y) + \sum X (\sum YX \sum Z - \sum X \sum YZ)}{\sum X^2 (n \sum Y^2 - (\sum Y)^2) - \sum YX (n \sum YX - \sum X \sum Y) + \sum X (\sum YX \sum Y - \sum X \sum Y^2)} \quad (3.15)$$

On déduit la valeur du coefficient  $C$  à partir de  $A$  et  $B$  :

$$A \sum X + B \sum Y + nC = \sum Z \quad (3.8)$$

$$nC = \sum Z - A \sum X - B \sum Y$$

$$C = \frac{1}{n} (\sum Z - A \sum X - B \sum Y) \quad (3.16)$$

### 3.7 Etude comparative entre les critères

Dans la figure 5.14, le critère normalisé a été identifié dans les normes ISO actuelles ou les normes **AFNOR** relatives aux méthodes de mesure. L'indication « bon » de bons résultats, voire meilleurs que le critère normalisé dans le cas des références. L'indication « correct » indique un critère acceptable si les autres critères ne sont pas disponibles [2].

Tableau 3.2 choix du critère [2]

| Critère d'association                                      | Défaut de forme | Référence            | Enveloppe | Zone projetée | Centre d'une section |
|--|-----------------|----------------------|-----------|---------------|----------------------|
| Moindres carrés $S = \sum e_i^2$ minimale                  | correct         |                      |           | bon           | norme                |
| Moindres carrés tangents                                   | correct         | bon                  | correct   | bon           | norme                |
| Minimax : minimise la distance maxi                        | norme           | norme (plan)         | correct   |               |                      |
| $R_{mini}$ : cylindre circonscrit de rayon minimal (arbre) |                 | norme <sup>(1)</sup> | norme     |               |                      |
| $R_{maxi}$ : cylindre inscrit de rayon maximal (alésage)   |                 | norme <sup>(1)</sup> | norme     |               |                      |
| (1) avec critère secondaire minimax                        |                 |                      |           |               |                      |

### 3.8 Commentaire du tableau

Pour un plan de référence, la norme impose le plan minimax obtenu avec un grand nombre de points. Une très bonne solution est le plan des moindres carrés tangent (ou décalé de la moitié de l'écart de planéité calculé avec les moindres carrés) qui est beaucoup plus stable que le plan minimax s'il y a peu de points.

L'axe d'un cylindre de référence est obtenu, selon la norme, par le critère  $R_{maxi}$  pour un alésage ou  $R_{mini}$  pour un arbre en ajoutant un critère secondaire minimax pour éviter l'incertitude due à un défaut de conicité. Il est préférable d'utiliser le critère des moindres carrés, qui est plus universel.

L'écart de forme (planéité, circularité, cylindricité) est obtenu par le critère minimax avec un grand nombre de points. En imitant le nombre de points, l'écart est réduit. L'écart de forme donné par les moindres carrés est satisfaisant, mais surestimé d'environ 10% par rapport au critère minimax. Ce supplément compense la minoration due à l'échantillonnage du plan par un faible nombre de points.

Le diamètre de l'enveloppe d'un cylindre est donné par le critère  $R_{maxi}$  pour un alésage ou  $R_{mini}$  pour un arbre. Le diamètre obtenu avec le critère minimax tangent ou avec les moindres carrés tangent ou avec les moindres carrés décalé de la moitié du défaut de cylindricité est un rayon satisfaisant.

Pour identifier le centre d'une section circulaire, la norme propose les moindres carrés.

Les normes ne donnent aucune indication pour les spécifications en zone projetée. La méthode des moindres carrés qui donne une bonne direction des surfaces semble bien adaptée [2].

### **3.9 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents critères d'ajustements. Puis, nous avons réalisé le modèle mathématique par la méthode des moindres carrés (LS) pour le cas de la planéité, la méthode de Cramer a été utilisée pour la résolution du système matriciel.

En fin une étude comparative entre les différents critères a été menée, pour montrer les critères de choix et l'avantage et l'inconvénient de chaque critère.

## Chapitre 4

# PROGRAMMATION ET VALIDATION

## 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons voir le programme GFDSOft réalisé, ainsi que les différents algorithmes qui ont été l'ossature de sa programmation. Nous verrons ensuite des applications à différentes pièces (de test et industrielles). Une étude comparative sera menée pour prouver ses performances, sa robustesse et sa validation.

## 4.2 Programmation

Nous avons réalisé un programme informatique, que nous avons appelé GFDSOft (Geometrical Form Defect Software), pour le calcul du défaut de forme (planéité). Ce logiciel a été développé sous le langage de programmation Python 3.5 et PyQt. Nous avons choisi Python, car il est un langage basé sur les scripts de haut niveau. Il est simple à programmer, structuré et open source et multiplateforme (Windows, Linux, Mac OS...) [39].

PyQt est un module qui permet de lier le langage Python avec la bibliothèque Qt. Il permet ainsi de créer des interfaces graphiques sous python. Nous avons utilisé une extension de QtDesigner (utilitaire graphique de création d'interfaces Qt), il permet de gérer le code python d'interfaces graphiques [40].

## 4.3 Algorithmes et interfaces graphiques

### 4.3.1 Vérification du nombre de points palpés

Comme indiqué dans le tableau 3.1, le nombre minimal de points palpés pour calculer le défaut de planéité doit être supérieur ou égale à 4 points. L'algorithme suivant montre les étapes de cette vérification.

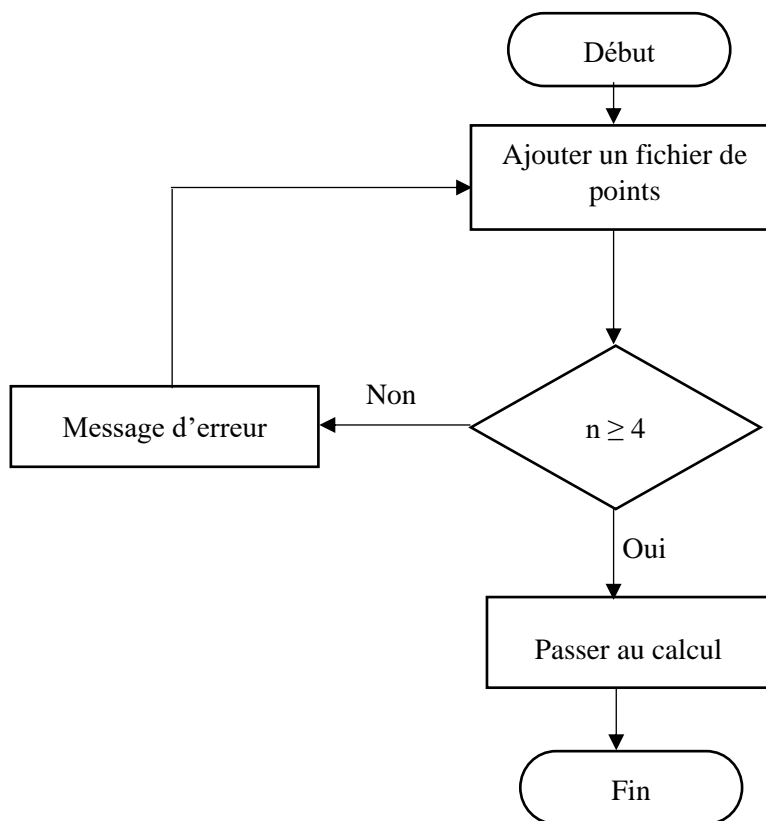


Figure 4.1 Algorithme de vérification du nombre de points palpés

La figure 4.2 donne un exemple de vérification du nombre de points palpés. Nous avons volontairement chargé un fichier texte comportant 3 points, l'interface montre bien que notre programme a rejeté ce fichier.



Figure 4.2 Message de vérification du nombre de points palpés

#### 4.3.2 Algorithme de calcul du défaut de planéité

La figure 4.3 représente l'algorithme de calcul du défaut de planéité.

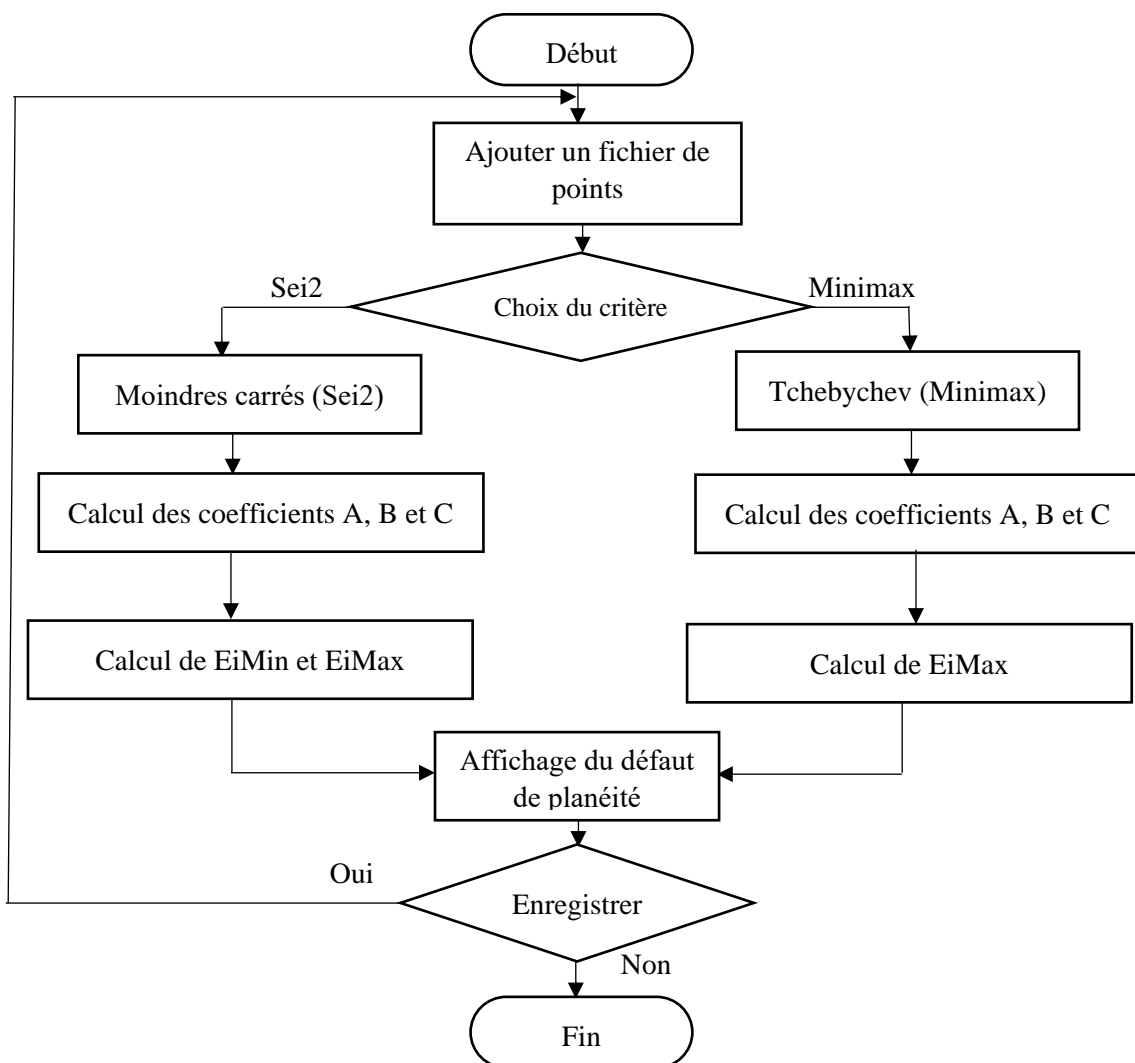


Figure 4.3 Algorithme de calcul du défaut de planéité

#### 4.3.3 Format des fichiers de points

Le fichier de points peut provenir, d'une machine à mesurer tridimensionnelle ou d'une simulation numérique par éléments finis, comme le montre la figure 4.4.

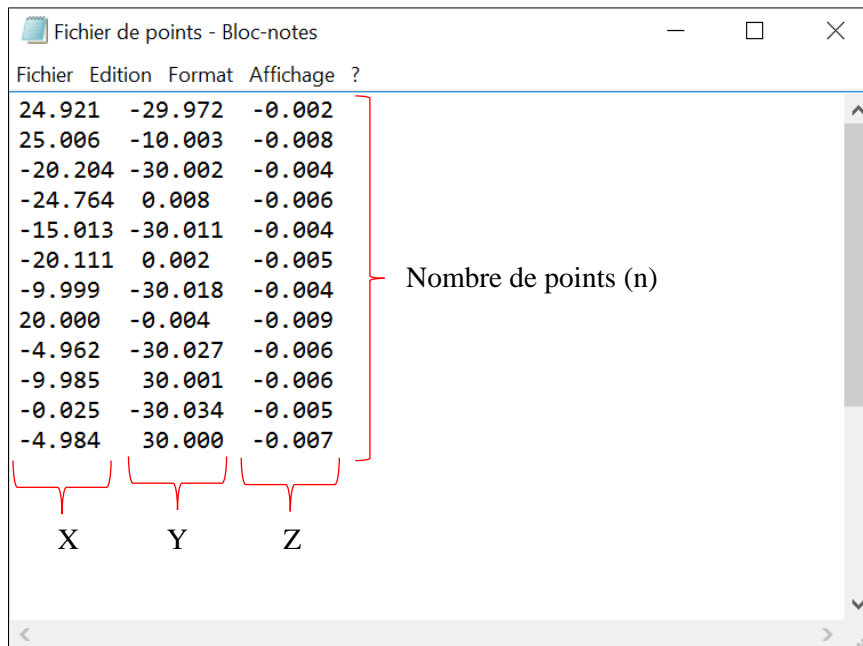


Figure 4.4 Format du fichier de points

### 4.3.4 Interface du programme

Sur la base de la modélisation mathématique (chapitre 3, section 3.6) et des algorithmes cités précédemment, nous avons réalisé notre programme GFDSOft, qui permet de calculer et d’afficher le défaut de planéité, selon les deux critères (Moindres carrés et Tchebychev).

L’interface du programme est donnée par la figure 4.5.

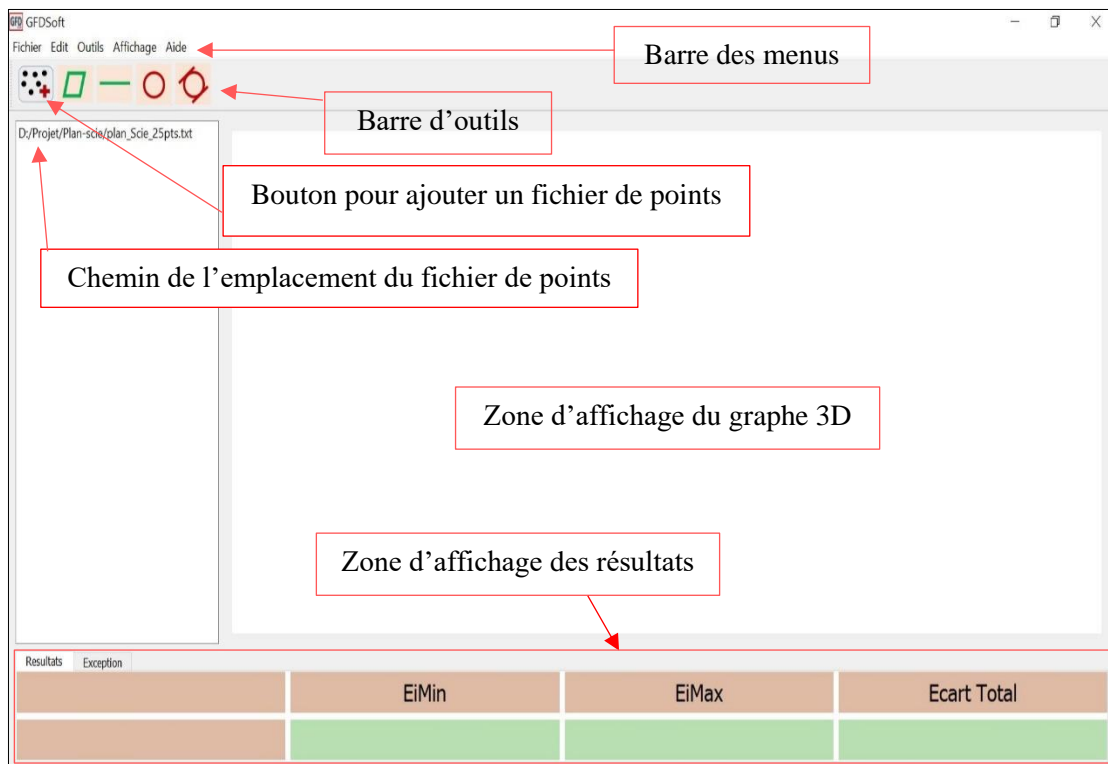


Figure 4.5 Interface du programme

Lors de la conception de l'interface de notre logiciel, nous nous sommes inspirés de l'interface du logiciel expérimental Geoverif (version de prêt), développé par Pairel [15], [41], [42], [43], [44], [45], au laboratoire SYMME, de l'université de Savoie (France). L'interface graphique de notre programme est très simple. Elle réalise l'interactivité avec l'utilisateur. Elle est constituée de boutons permettant l'accès direct aux différents défauts de formes, qu'on veut mesurer. Les résultats sont donnés directement sur la zone d'affichage en bas de l'écran.

## 4.4 Ajustement par le critère des moindres carrés

### 4.4.1 Application à une pièce test

- *Face usinée*

Nous prendrons pour pièce de test, une pièce prismatique en Aluminium extrudé sciée et fraisée (usinée) sur une de ces faces. Nous allons palper des points, pour avoir une définition de palpement allant de 9 à 81 points de mesure.

Nous allons utiliser une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), du Laboratoire SYMME (Université de Savoie, France), pour avoir le fichier des points palpés.

- Type de palpeur : Palpeur TP2

- Milieu : La machine est située dans un local climatisé, la température est régulée à  $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Puis nous exporterons ce fichier de points dans notre logiciel GFDSOft. A partir des nuages de points prélevés, nous allons mesurer le défaut de forme (planéité) de notre pièce suivant le critère des moindres carrés (Sei2).

La figure 4.6, représente le résultat du traitement du fichier de 25 points de palpement de la face usinée. Le plan des moindres carrés est donné en couleur rouge, le plan en bleu représente l'extrapolation du plan des moindres carrés passant par le point le plus éloigné, côté extérieur matière. La distance entre ces deux plans est notée EiMax. Enfin le plan en vert montre l'extrapolation du plan des moindres carrés passant par le point le plus éloigné, côté intérieur matière. La distance entre ces deux plans est notée EiMin.

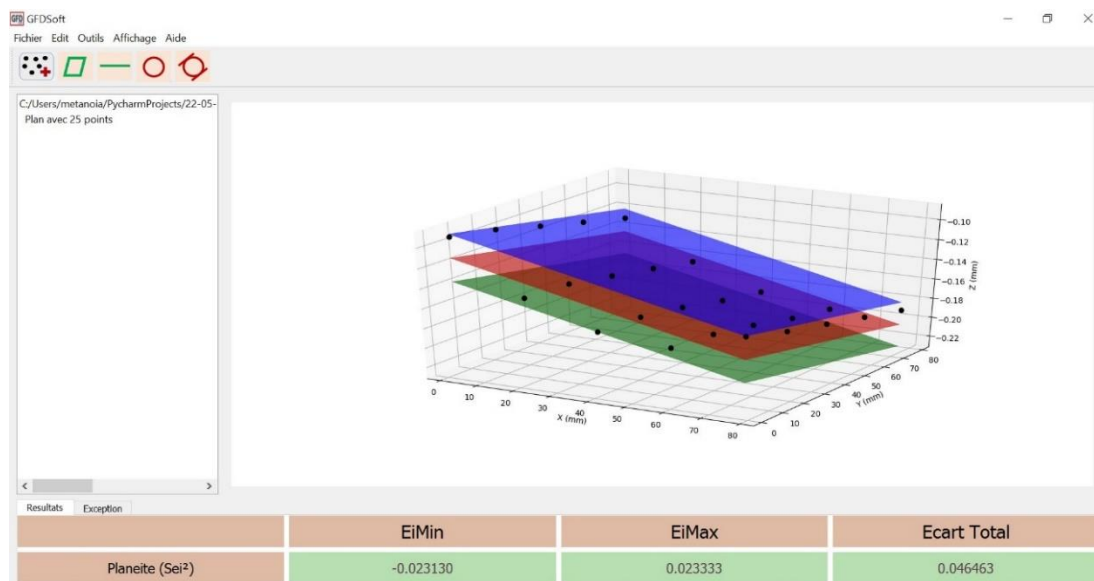


Figure 4.6 Résultat du traitement du fichier de 25 points de la face usinée



La figure 4.7, représente le résultat du traitement du fichier de 81 points de palpation de la face usinée.

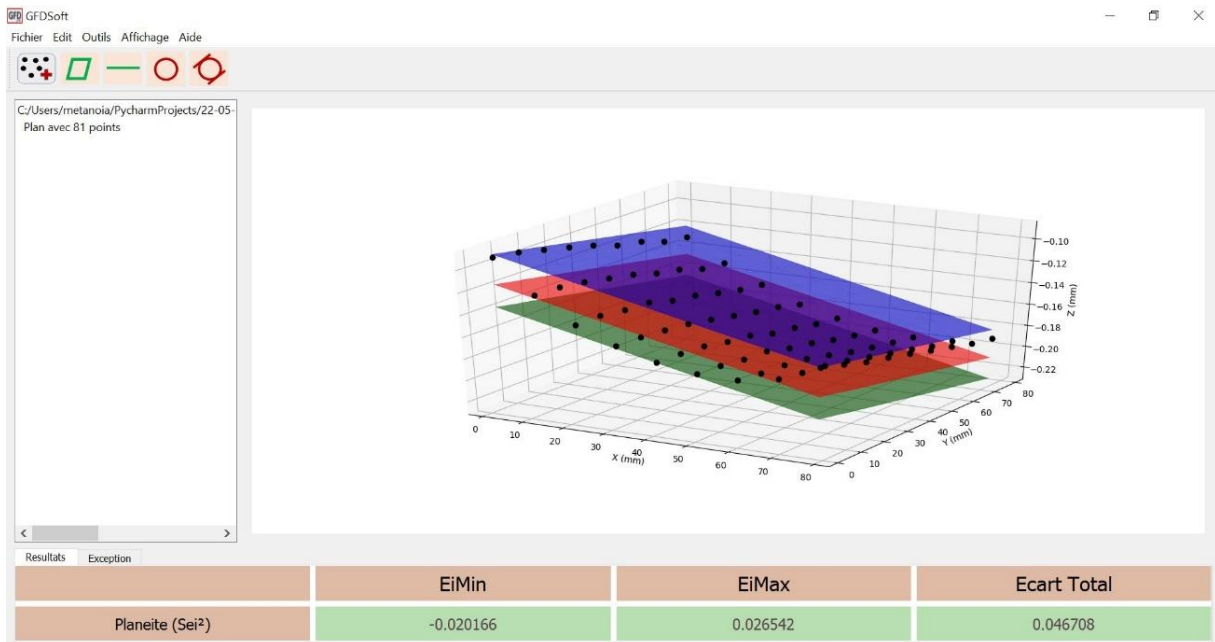


Figure 4.7 Résultat du traitement du fichier de 81 points de la face usinée

- **Face sciée**

La figure 4.8, illustre le résultat du traitement du fichier de 25 points de palpation de la face sciée.

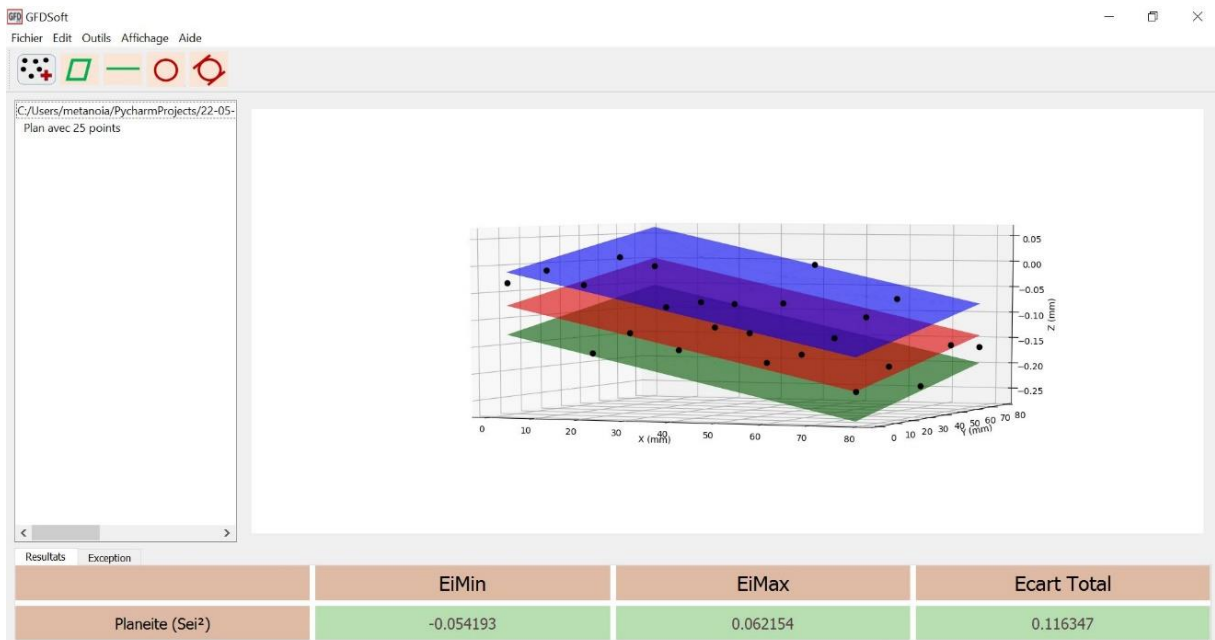


Figure 4.8 Résultat du traitement du fichier de 25 points de la face sciée

La figure 4.9, illustre le résultat du traitement du fichier de 81 points de palpation de la face sciée.

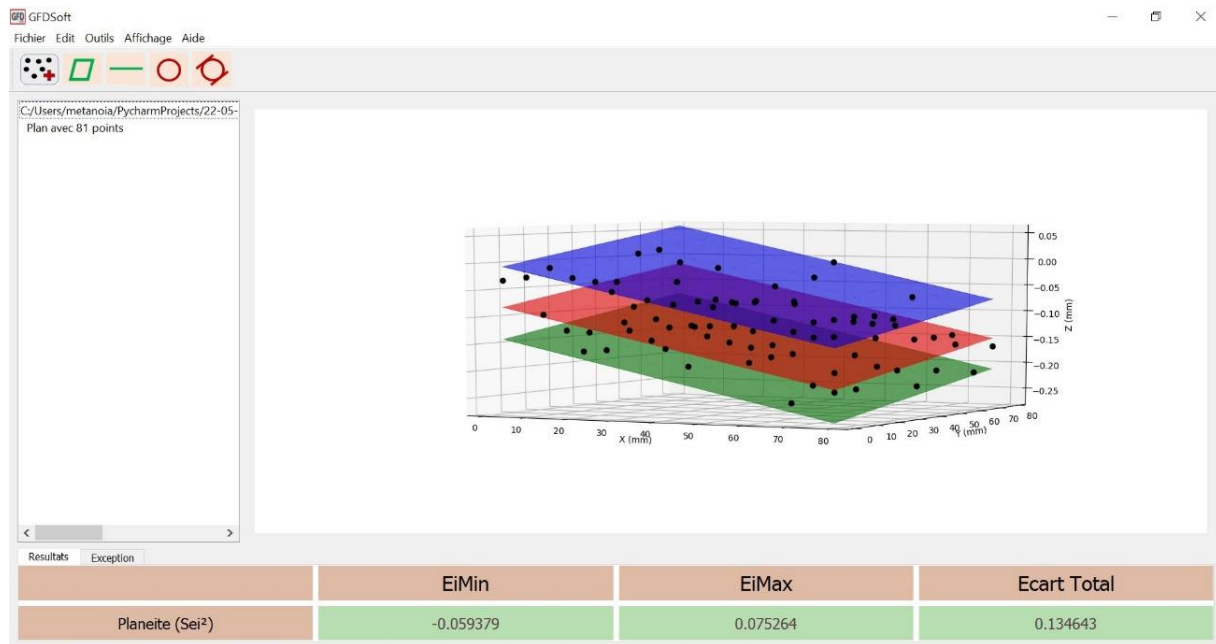


Figure 4.9 Résultat du traitement du fichier de 81 points de la face sciée

#### 4.4.2 Application à la pièce de M. Mangouchi

Nous prendrons pour deuxième application les résultats de Mangouchi [8]. Il a pris pour pièce d'essai, un palier moteur usiné sur un tour parallèle conventionnel [8]. Il a utilisé une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), du Laboratoire de Métrologie, de l'École Nationale Polytechnique d'Oran (figure 4.10), pour avoir le fichier des points palpés.

- Type de palpeur : Palpeur TP2
- Milieu : La machine est située dans un local climatisé, la température est réglée à  $20^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ .



Figure 4.10 Contrôle de la planéité du palier sur MMT du Laboratoire de Métrologie (ENP d'Oran) [8]

Il a réalisé trois balancements (mesurages), pour avoir une meilleure précision de contrôle. Puis il a mesuré le défaut de forme (planéité) à l'aide du logiciel Metrosoft de la machine. Nous exploiterons ce fichier de points, que nous exporterons dans notre logiciel GFDSOFT. A partir des nuages de points prélevés, nous allons mesurer le défaut de planéité du palier moteur suivant le critère des moindres carrés.

- **Premier et deuxième balancement**

Pour le premier et deuxième balancement, la surface à contrôler est parallèle au marbre de la MMT, comme illustré par la figure 4.10. Mangouchi [8] a posé et fixé la pièce d'essai sur le marbre de la MMT. Il a fait déplacer le capteur manuellement tout en palpant successivement les points désignés (marqués) sur la surface à contrôler.

Le logiciel enregistre les coordonnées correspondant de chaque point palpé. Les coordonnées des points palpés, du premier et du deuxième balancement, sont données au tableau 4.1 [8].

Tableau 4.1 Coordonnées des points palpés du premier et du deuxième balancement [8]

| No. | Premier balancement |           |          | Deuxième balancement |          |           |
|-----|---------------------|-----------|----------|----------------------|----------|-----------|
|     | X                   | Y         | Z        | X                    | Y        | Z         |
| 1   | 59.7709             | -106.2695 | -34.1648 | -34.3413             | 59.6105  | -106.2685 |
| 2   | -9.7500             | -106.3199 | -34.0860 | -19.3711             | 66.5269  | -106.2790 |
| 3   | 24.2782             | -106.3574 | 26.0406  | -3.2479              | 65.0134  | -106.2980 |
| 4   | 66.3939             | -106.2795 | -19.1706 | 11.6768              | 58.9040  | -106.3179 |
| 5   | 65.3739             | -106.2970 | -2.7694  | 22.1094              | 46.2711  | -106.3384 |
| 6   | 58.7580             | -106.3179 | 11.9068  | 28.3696              | 29.3002  | -106.3564 |
| 7   | 46.4881             | -106.3379 | 22.2719  | 25.9581              | 24.9967  | -106.3589 |
| 8   | 29.8867             | -106.3564 | 29.0196  | 26.3206              | 13.5193  | -106.3654 |
| 9   | 13.7133             | -106.3649 | 26.3301  | 18.9351              | -1.5036  | -106.3684 |
| 10  | 13.9613             | -106.3649 | 26.1806  | 7.4860               | -12.0350 | -106.3634 |
| 11  | -1.4096             | -106.3679 | 18.7166  | -8.6617              | -17.2159 | -106.3504 |
| 12  | -11.8500            | -106.3624 | 7.0280   | -25.4909             | -15.3579 | -106.3314 |
| 13  | -16.8314            | -106.3499 | -8.7102  | -33.8210             | -10.4845 | -106.3199 |
| 14  | -15.7004            | -106.3299 | -26.0729 | -39.6696             | -6.9635  | -106.3104 |
| 15  | -7.8515             | -106.3089 | -40.6441 | -51.1313             | 4.2849   | -106.2880 |
| 16  | 4.2404              | -106.2875 | -51.4903 | -55.3719             | 19.0963  | -106.2745 |
| 17  | 19.1963             | -106.2730 | -55.6539 | -54.4104             | 35.0741  | -106.2645 |
| 18  | 35.2646             | -106.2625 | -54.9044 | -46.5304             | 51.3215  | -106.2610 |
| 19  | 51.3360             | -106.2595 | -47.0009 | -18.4496             | 53.8625  | -106.2999 |
| 20  | 54.1555             | -106.2990 | -18.3136 | 3.1417               | 46.4021  | -106.3294 |
| 21  | 47.7706             | -106.3274 | 3.4962   | 14.5719              | 27.3817  | -106.3549 |
| 22  | 27.5422             | -106.3544 | 15.1459  | 9.9354               | 7.9259   | -106.3629 |
| 23  | 7.0644              | -106.3624 | 10.0405  | -10.2153             | -5.0890  | -106.3494 |

|    |         |           |          |          |         |           |
|----|---------|-----------|----------|----------|---------|-----------|
| 24 | -4.6215 | -106.3489 | -10.4812 | -31.8670 | 2.3159  | -106.3229 |
| 25 | 1.7444  | -106.3219 | -32.3215 | -43.6973 | 21.0343 | -106.2960 |
| 26 | 21.1468 | -106.2950 | -43.7723 | -37.1723 | 43.0341 | -106.2880 |
| 27 | 43.1166 | -106.2875 | -37.0668 | -34.3413 | 59.6105 | -106.2685 |

- **Troisième balancement**

La surface à contrôler est inclinée par rapport au marbre de la MMT, comme représenté par la figure 4.11. Mangouchi [8] a posé un coté de la surface inférieure de la pièce sur le marbre de la MMT et l'autre coté sur une cale étalon. Celle-ci est posée sur le marbre. Il a fait déplacer le capteur manuellement tout en palpant successivement les points désignés (marqués) sur la surface de la pièce.



Figure 4.11 Troisième balancement [8]

Le logiciel enregistre les coordonnées correspondant à chaque point palpé (Tableau 4.2) [8].

Tableau 4.2 Coordonnées des points palpés du troisième balancement [8]

| 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 |
| 27 | -68.1340 | 11.4197  | -110.8455 |

La figure 4.12, montre le résultat de l'application de GFDSOft au nuage de points de Mangouchi, pour le cas du premier balancement.

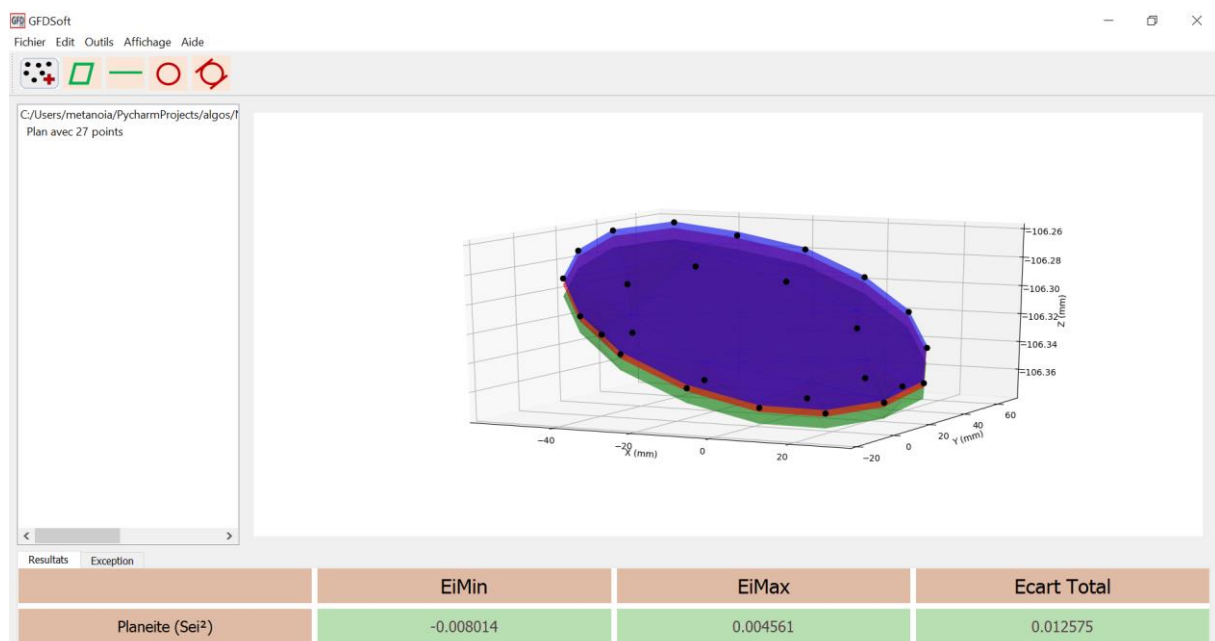


Figure 4.12 Résultat du traitement de la pièce de Mangouchi

La figure 4.13, illustre le graphe de la comparaison des résultats du contrôle de la planéité du palier moteur, pour les trois balancements, en utilisant les deux logiciels GFDSOft et Geoverif (critère des moindres carrés).

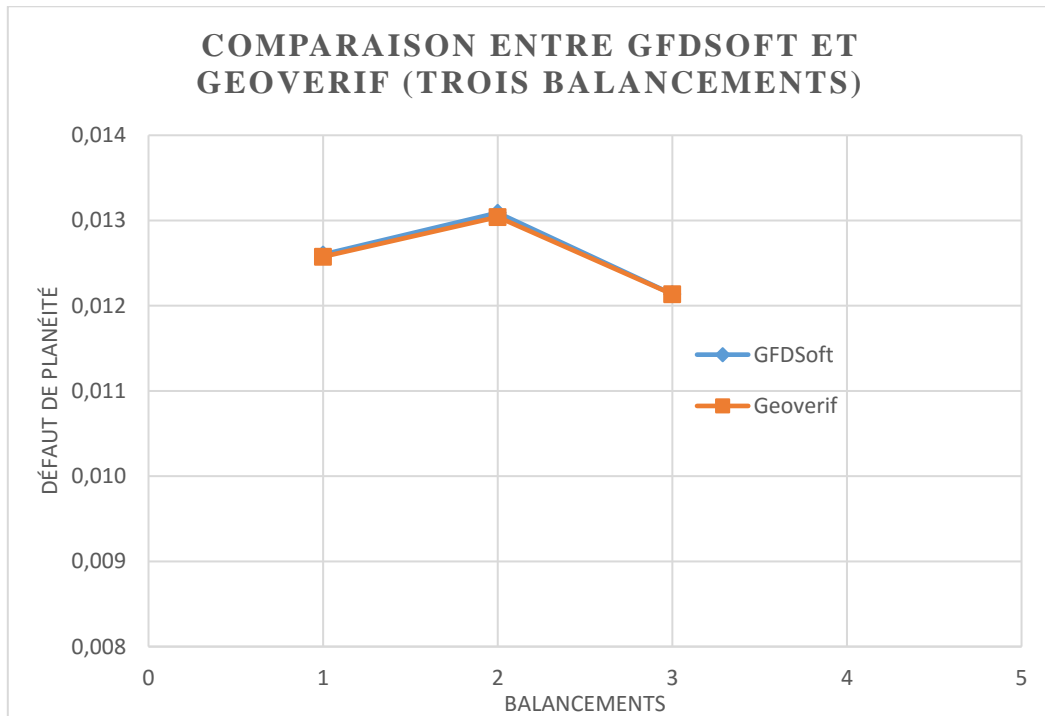


Figure 4.13 Graphe de la comparaison des résultats du contrôle de la planéité par GFDSOft et Geoverif

La figure 4.14, représente le graphe de la comparaison des résultats du contrôle de la planéité du palier moteur, pour les trois balancements, en utilisant les deux logiciels GFDSOft et Metrosoft (critère des moindres carrés).

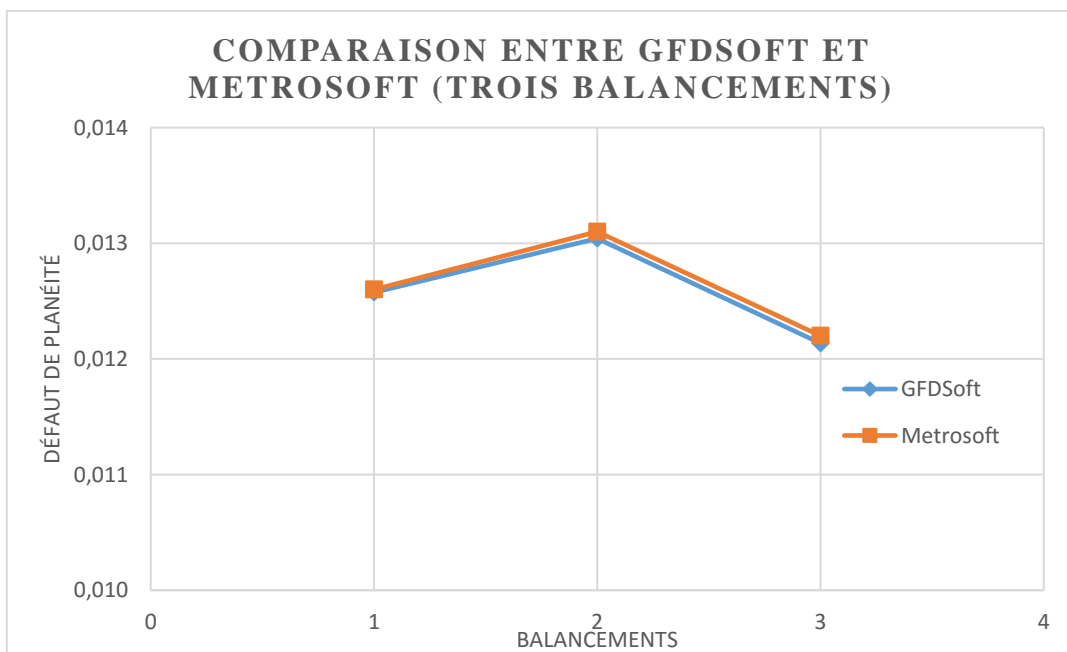


Figure 4.14 Graphe de la comparaison des résultats du contrôle de la planéité par GFDSOft et Metrosoft

Dans le graphe de la figure 4.13, nous constatons que le défaut de planéité trouvé par le critère d'ajustement des moindres carrés, en utilisant notre logiciel GFDSOft est pratiquement le même que celui trouvé en utilisant le logiciel expérimental Geoverif.

Le graphe de la figure 4.14, montre que le défaut de planéité trouvé par le critère d'ajustement des moindres carrés, en utilisant le logiciel GFDSOft est le même que celui trouvé par Mangouchi en utilisant le logiciel Metrosoft de la machine à mesurer tridimensionnelle (Laboratoire ENP Oran), à savoir « 0,013 mm ». Donc, les performances de notre logiciel (GFDSOft) sont prouvées.

#### **4.4.3 Application à la pièce de M. Jolid**

Nous prendrons pour troisième application les résultats de Jolid [46]. Il a pris une pièce industrielle mesurée en 24 points. Le tableau 4.3 donne les coordonnées de ces points.

Tableau 4.3 Coordonnées des points palpés de la pièce de Jolid [46]

| No. | X       | Y       | Z      |
|-----|---------|---------|--------|
| 1   | 24.921  | -29.972 | -0.002 |
| 2   | -20.204 | -30.002 | -0.004 |
| 3   | -15.013 | -30.011 | -0.004 |
| 4   | -9.999  | -30.018 | -0.004 |
| 5   | -4,962  | -30.027 | -0.006 |
| 6   | -0.025  | -30.034 | -0.005 |
| 7   | 4,992   | -30.005 | -0.006 |
| 8   | 10.041  | -30.000 | -0.005 |
| 9   | -20.218 | -9.995  | -0.008 |
| 10  | -15.006 | -10.002 | -0.007 |
| 11  | 15.015  | -9.998  | -0.009 |
| 12  | 19.978  | -10.002 | -0.009 |
| 13  | 25.006  | -10.003 | -0.008 |
| 14  | -24.764 | 0.008   | -0.006 |
| 15  | -20.111 | 0.002   | -0.005 |
| 16  | 20.000  | -0.004  | -0.009 |
| 17  | -9.985  | 30.001  | -0.006 |
| 18  | -4.984  | 30.000  | -0.007 |
| 19  | -0.034  | 30.003  | -0.007 |
| 20  | 5.017   | 29.997  | -0.006 |
| 21  | 9.978   | 30.001  | -0.005 |
| 22  | 14.996  | 30.000  | -0.007 |

|    |        |        |        |
|----|--------|--------|--------|
| 23 | 19.972 | 30.002 | -0.004 |
| 24 | 25.031 | 29.999 | -0.003 |

Puis nous exporterons ce fichier de points dans notre logiciel GFDSOft. A partir du nuage de points prélevés, nous allons mesurer le défaut de planéité de la pièce industrielle suivant le critère (moindres carrés  $Sei^2$ ), pour 24 points de mesure (palpage).

La figure 4.15, montre le résultat de l'application de GFDSOft au nuage de points de la pièce de Jalid.

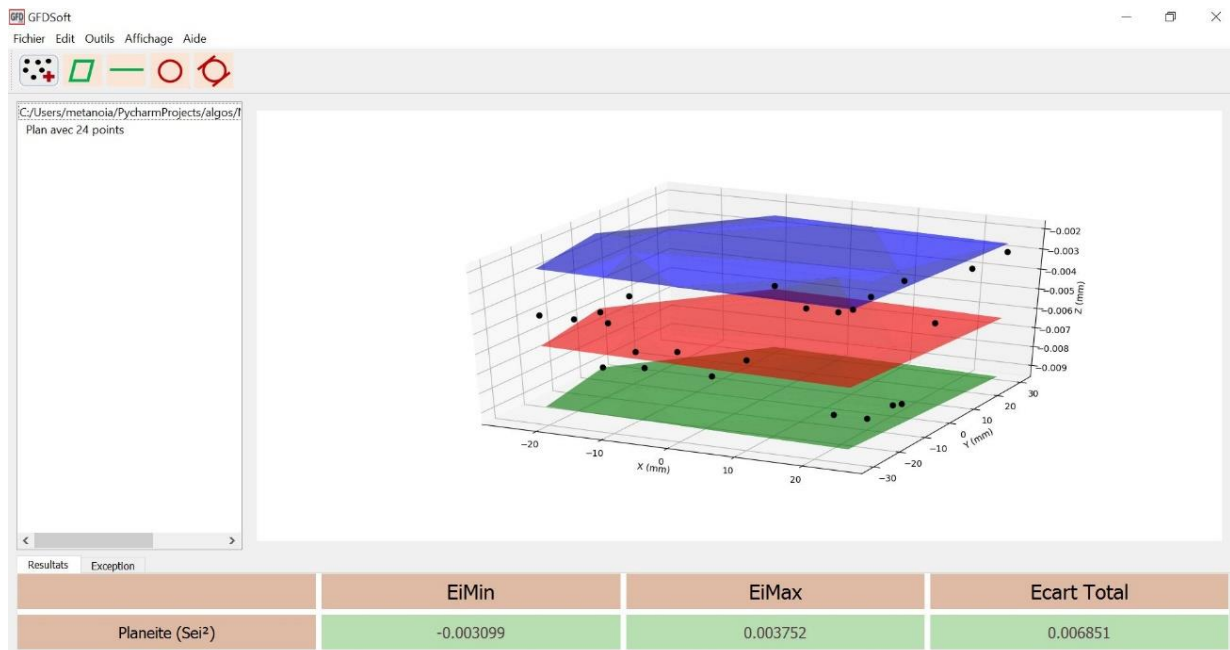


Figure 4.15 Résultat du traitement du nuage de points de la pièce de Jalid

Le défaut de planéité trouvé par le critère d'ajustement des moindres carrés, en utilisant le logiciel GFDSOft est le même que celui trouvé par Jalid, à savoir « 0,0068 mm ».

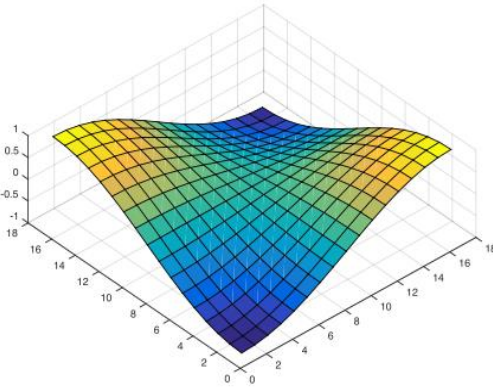
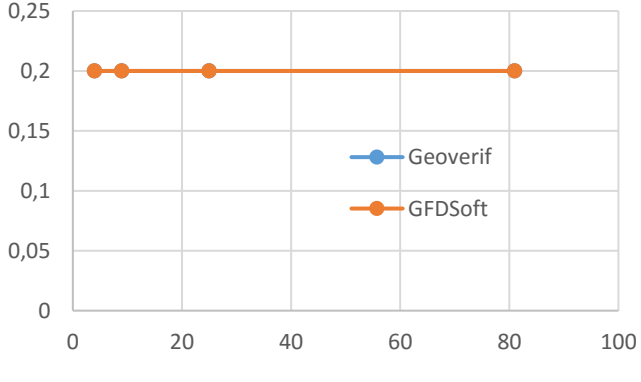
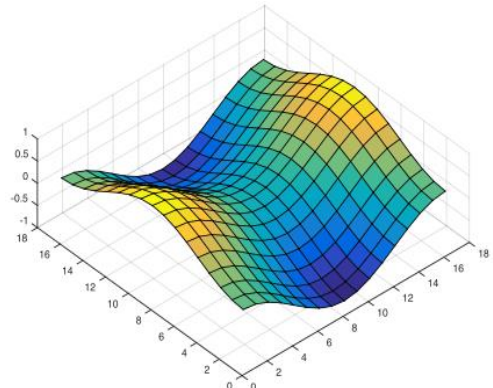
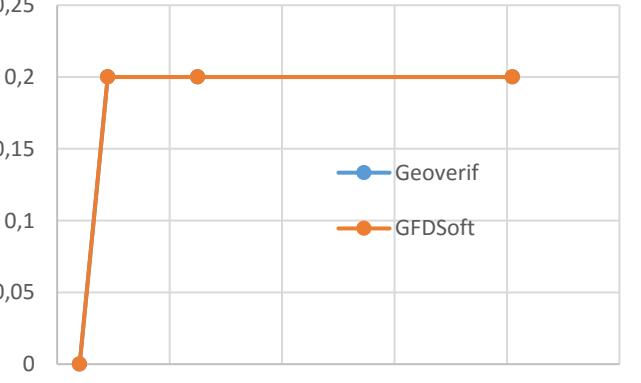
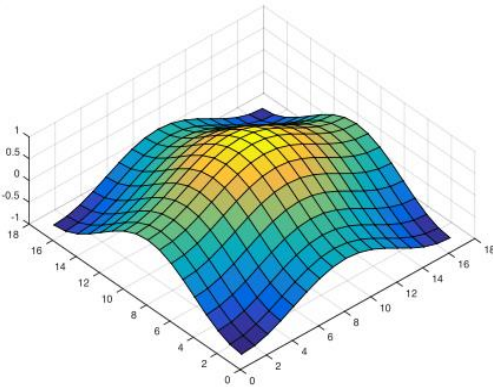
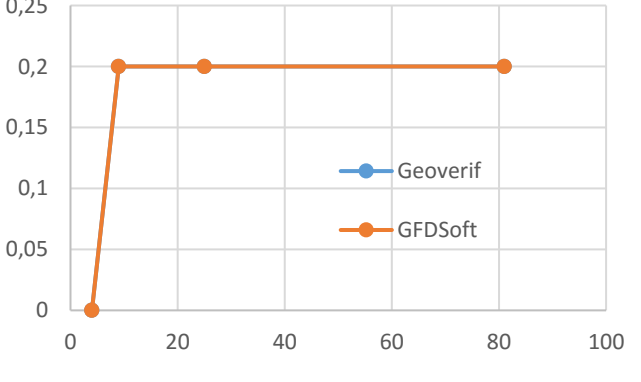
#### 4.4.4 Application à des surfaces déformées numériquement

Afin de tester la stabilité de notre logiciel, nous avons généré, par éléments finis, les premiers modes (surfaces modales) de déformation d'une plaque carrée mince de 80 mm de côté. Puis nous allons récupérer les fichiers des points des trois premiers modes (4, 5 et 6) et mesurer leurs défauts de planéité. A titre d'indication, les trois premiers modes (1, 2 et 3) sont des modes rigides, c'est à dire que la plaque ne se déforme pas mais ne fait que se déplacer.

Le tableau 4.4 représente les visualisations de ces surfaces modales et l'évolution du défaut de forme mesuré selon le critère des moindres carrés, en utilisant les logiciels GFDSOft et Geoverif.



Tableau 4.4 Visualisations des surfaces modales et l'évolution du défaut de forme mesuré en utilisant les logiciels GFDSOft et Geoverif

| Visualisations des surfaces modales  | Evolution du défaut de forme mesuré selon le critère des moindres carrés   |           |          |         |   |     |     |   |     |     |    |     |     |    |     |     |
|--|--|-----------|----------|---------|---|-----|-----|---|-----|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|
| <p>Selle de cheval diagonale (mode 4) :</p>   | <p>Mode 4</p>  <table border="1"> <caption>Data for Mode 4</caption> <thead> <tr> <th>Iteration</th> <th>Geoverif</th> <th>GFDSOft</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0.2</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0.2</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>0.2</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>80</td> <td>0.2</td> <td>0.2</td> </tr> </tbody> </table> | Iteration | Geoverif | GFDSOft | 0 | 0.2 | 0.2 | 5 | 0.2 | 0.2 | 25 | 0.2 | 0.2 | 80 | 0.2 | 0.2 |
| Iteration  | Geoverif   | GFDSOft   |          |         |   |     |     |   |     |     |    |     |     |    |     |     |
| 0  | 0.2  | 0.2       |          |         |   |     |     |   |     |     |    |     |     |    |     |     |
| 5  | 0.2  | 0.2       |          |         |   |     |     |   |     |     |    |     |     |    |     |     |
| 25   | 0.2  | 0.2       |          |         |   |     |     |   |     |     |    |     |     |    |     |     |
| 80   | 0.2  | 0.2       |          |         |   |     |     |   |     |     |    |     |     |    |     |     |
| <p>Selle de cheval parallèle (mode 5) :</p>  | <p>Mode 5</p>  <table border="1"> <caption>Data for Mode 5</caption> <thead> <tr> <th>Iteration</th> <th>Geoverif</th> <th>GFDSOft</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>0</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>80</td> <td>0</td> <td>0.2</td> </tr> </tbody> </table>          | Iteration | Geoverif | GFDSOft | 0 | 0   | 0   | 5 | 0   | 0.2 | 25 | 0   | 0.2 | 80 | 0   | 0.2 |
| Iteration  | Geoverif   | GFDSOft   |          |         |   |     |     |   |     |     |    |     |     |    |     |     |
| 0  | 0  | 0         |          |         |   |     |     |   |     |     |    |     |     |    |     |     |
| 5  | 0  | 0.2       |          |         |   |     |     |   |     |     |    |     |     |    |     |     |
| 25   | 0  | 0.2       |          |         |   |     |     |   |     |     |    |     |     |    |     |     |
| 80   | 0  | 0.2       |          |         |   |     |     |   |     |     |    |     |     |    |     |     |
| <p>Mono-bosse (mode6) :</p>                 | <p>Mode 6</p>  <table border="1"> <caption>Data for Mode 6</caption> <thead> <tr> <th>Iteration</th> <th>Geoverif</th> <th>GFDSOft</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>25</td> <td>0</td> <td>0.2</td> </tr> <tr> <td>80</td> <td>0</td> <td>0.2</td> </tr> </tbody> </table>         | Iteration | Geoverif | GFDSOft | 0 | 0   | 0   | 5 | 0   | 0.2 | 25 | 0   | 0.2 | 80 | 0   | 0.2 |
| Iteration  | Geoverif   | GFDSOft   |          |         |   |     |     |   |     |     |    |     |     |    |     |     |
| 0  | 0  | 0         |          |         |   |     |     |   |     |     |    |     |     |    |     |     |
| 5  | 0  | 0.2       |          |         |   |     |     |   |     |     |    |     |     |    |     |     |
| 25   | 0  | 0.2       |          |         |   |     |     |   |     |     |    |     |     |    |     |     |
| 80   | 0  | 0.2       |          |         |   |     |     |   |     |     |    |     |     |    |     |     |

Les défauts de planéité trouvés par le critère d'ajustement des moindres carrés, en utilisant notre logiciel GFDSOft sont exactement les mêmes que ceux trouvés en utilisant le logiciel

expérimental Geoverif. On peut donc conclure que les performances de notre logiciel sont prouvées.

#### 4.5 Ajustement par le critère de Tchebychev (Minimax)

Lors de la programmation, nous nous sommes inspirés de l'algorithme présenté par Rey et Ward [47].

Les étapes de programmation sont :

1. Trouver la coque convexe par l'algorithme de Graham [48] ;
2. Trouver le bord convexe avec la plus petite erreur possible ;
3. L'ajustement Minimax est donné par le plan entre le bord le plus petit accidenté de la coque convexe et le point le plus éloigné.

##### 4.5.1 Application à la face usinée de la pièce test

Nous commençons par importer le fichier de points dans notre logiciel GFDSOft. A partir des nuages de points prélevés, nous allons mesurer le défaut de forme (planéité) de notre pièce suivant le critère de Tchebychev (Minimax).

La figure 4.16, représente le résultat du traitement du fichier de 25 points de palpation de la face usinée. Le plan Minimax est donné en couleur rouge et le plan en bleu représente l'extrapolation du plan Minimax passant par le point le plus éloigné, côté intérieur matière. La distance entre ces deux plans est notée  $E_{iMax}$ . Elle représente le défaut de planéité.

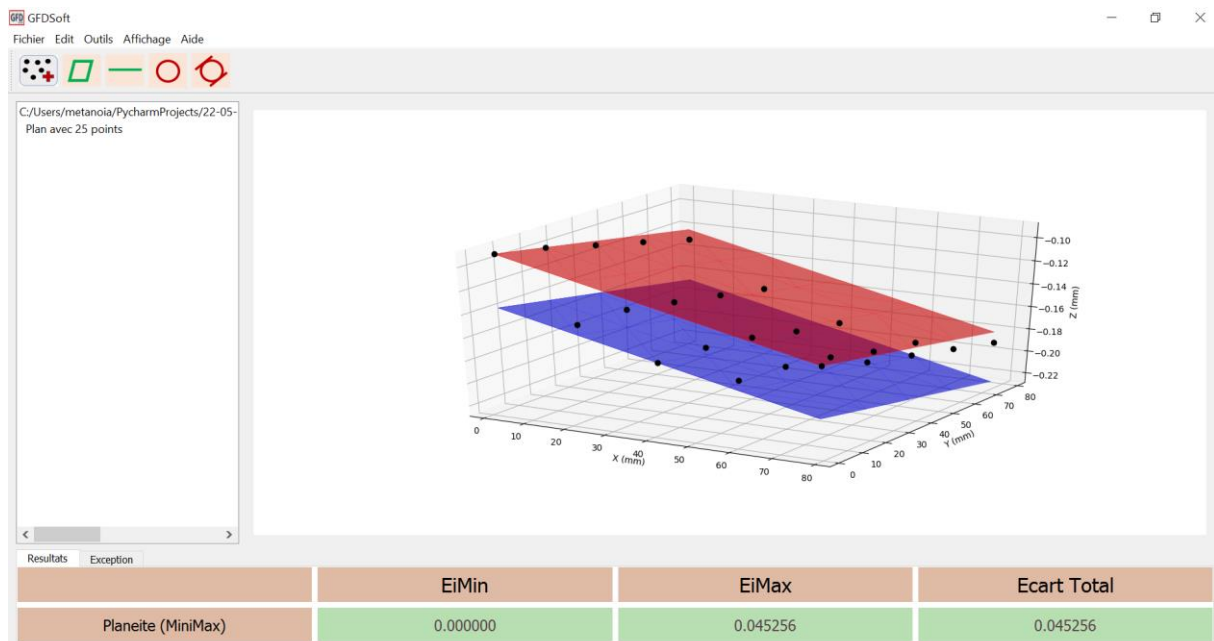


Figure 4.16 Résultat du traitement de 25 points de la face usinée par le critère Minimax

La figure 4.17, représente le résultat du traitement du fichier de 81 points de palpation de la face usinée.

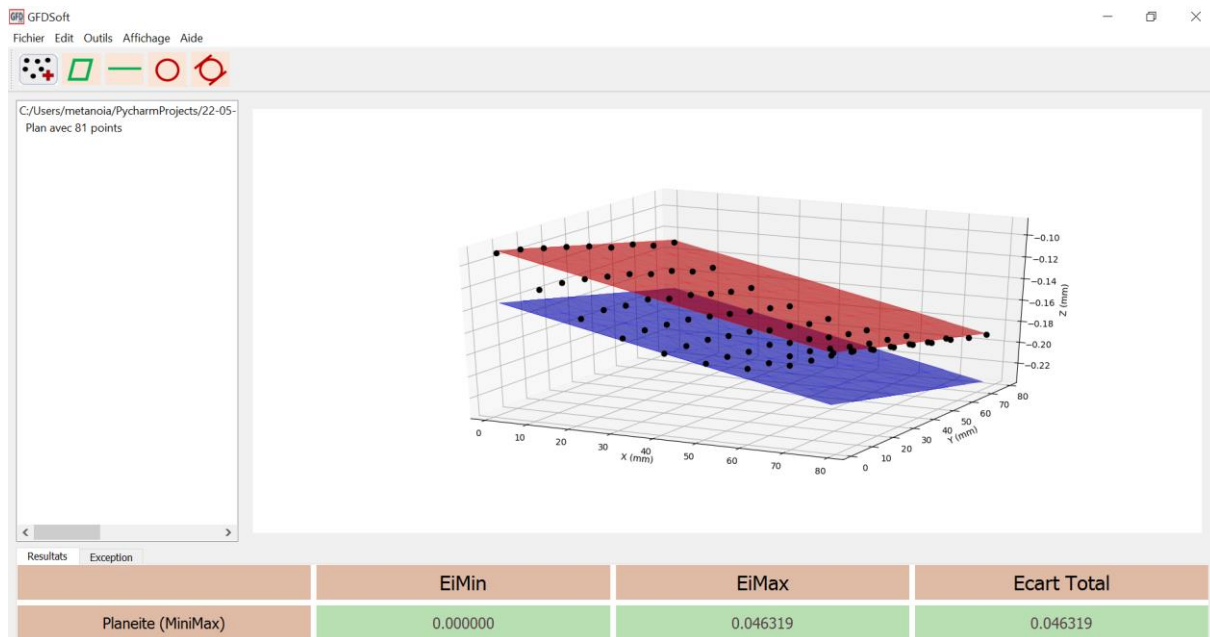


Figure 4.17 Résultat du traitement de 81 points de la face usinée par le critère Minimax

#### 4.5.2 Application à la face sciée de la pièce test

La figure 4.18, représente le résultat du traitement du fichier de 25 points de palpate de la face sciée.

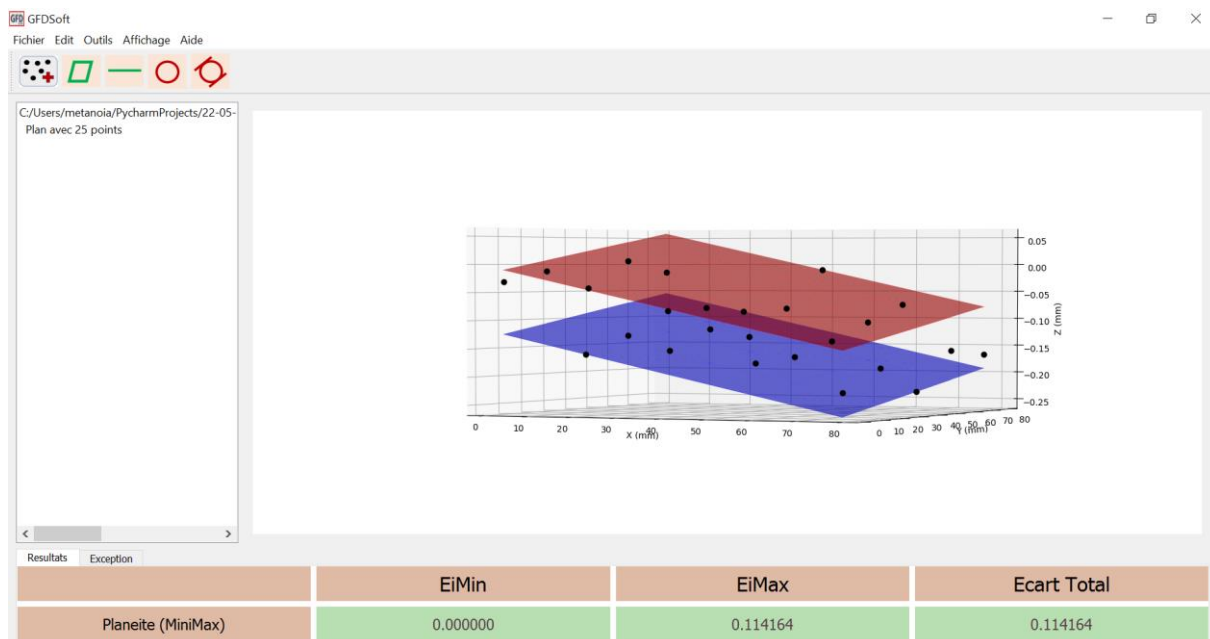


Figure 4.18 Résultat du traitement de 25 points de la face sciée par le critère Minimax

La figure 4.19, représente le résultat du traitement du fichier de 81 points de palpate de la face sciée.



Figure 4.19 Résultat du traitement de 81 points de la face sciée par le critère Minimax

Les défauts de planéité trouvés par le critère d'ajustement de Tchebychev (Minimax), en utilisant notre logiciel GFDSOFT sont exactement les mêmes que ceux trouvés en utilisant le logiciel expérimental Geoverif. On peut donc conclure que les performances de notre logiciel sont vérifiées.

#### 4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les différents algorithmes qui ont servis à la réalisation de notre programme. Puis nous avons présenté son interface, les différents outils et les différentes zones de cette dernière. Ensuite nous avons appliqué notre logiciel sur différentes pièces (de test et industrielles), en utilisant les deux critères des moindres carrés et de Tchebychev. Puis une étude comparative entre notre logiciel, le logiciel expérimental Geoverif et le logiciel industriel Metrosoft a été menée. Les résultats trouvés sont très satisfaisants, ce qui nous permet de confirmer la validation de notre logiciel.

CONCLUSION  
GENERALE ET  
PERSPECTIVES

La détermination des défauts de forme revêt une très grande importance dans le domaine industriel, car elle conditionne dans bien des cas la fonctionnalité des assemblages ou des mécanismes. La mesure directe des défauts de forme est très difficile et elle entachée d'erreurs. Dans cette optique, notre travail présente un logiciel destiné pour la mesure des défauts de forme des pièces mécaniques usinées. Nous avons utilisé deux critères d'ajustements, des moindres carrés (Sei2) et celui de Tchebychev (Minimax). Le critère moindres carrés est le plus pratiqué (et souvent le seul disponible sur les machines à mesurer tridimensionnelles). Il est facile à exploiter et à programmer, par un simple calcul matriciel. Théoriquement, ce critère n'est pas satisfaisant, car le résultat dépend de la répartition des points sur la surface à contrôler (une sur densification "tire" la surface associée), pour cela, nous avons adopté une stratégie de répartition uniforme des points de palpée. Le critère de Tchebychev (Minimax) est plus complexe à programmer. Lors de sa programmation nous avons suivi trois étapes : trouver le « convexe hull » par l'algorithme de Graham, puis trouver le bord convexe avec la plus petite erreur possible enfin l'ajustement Minimax est donné par le plan entre le bord le plus petit accidenté de la coque convexe et le point le plus éloigné. Une étude comparative a été réalisée pour la vérification des résultats trouvés par notre logiciel GFDSOFT et deux autres logiciels (expérimental et industriel). Pour sa validation, notre logiciel a été testé avec succès sur une étude de cas réels (pièces industrielles). Nous insistons sur le fait que la valeur du défaut de forme est étroitement liée à la méthode d'optimisation retenue.

Notre logiciel offre les avantages suivants :

- A une interface utilisateur simple ;
- Fonctionne à partir de fichiers de points 3D (ou 2D) provenant de tout équipement de mesure ou même de logiciels de simulation numérique (mécanique) ;
- Mesure l'écart de forme (planéité), d'une façon directe et facilement interprétable (grâce à l'affichage du nuage de points en 3D et des différents plans d'ajustement en couleurs différentes).

Notre logiciel permettra de ne pas immobiliser la machine à mesurer tridimensionnelle (MMT) le temps d'élaborer de nouvelles gammes de contrôle, ce qui permettra de la réserver juste pour l'élaboration de nouveaux fichiers de points. Ceci, aura pour effet de faire des gains en temps et en argent pour les entreprises.

En perspectives nous prévoyons :

- D'étendre notre travail aux autres défauts de forme (notamment la circularité et la cylindricité), ainsi qu'aux autres défauts géométriques (positions et orientations).
- La réalisation d'une interface avec la CAO pour travailler sur des solutions entièrement numériques (depuis la conception de la pièce jusqu'à la préparation des gammes et les contrôles en fabrication).

REFERENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES



- [1] L. Bouamama, Cours de métrologie dimensionnelle, Office des publications Universitaires, 2007.
- [2] B. Anselmetti, Manuel de tolérancement : Volume 5, Métrologie avec les normes ISO, Volume 5, Edition Lavoisier, 2011.
- [3] M. Aublin, Exploitation du concept GPS et de la normalisation pour la spécification géométrique des produits, CERPET, 1999.
- [4] B. Anselmetti, Cotation de fabrication et métrologie : Volume 3, Edition Lavoisier, 2003.
- [5] Norme ISO 1101 : 2004, Geometrical product specifications (GPS)-Geometrical tolerancing –Tolerances of form, orientation, location and run-out, 2004.
- [6] A. Jolid, S. Hariri, A. El Gharad, M. Barkallah, Influence de la taille d'échantillonnage sur l'estimation de la planéité et de l'incertitude associée en mesure tridimensionnelle, Journées d'Etudes Techniques, Maroc, 2014.
- [7] A. Jolid, S. Hariri, N.E. Laghzale, Influence of sample size on flatness estimation and uncertainty in three-dimensional measurement, Int. Metrol. Qual. Eng. 6, 102, 2015.
- [8] A. Mangouchi, Exploration des moyens d'association de surfaces aux points palpés sur MMT, mémoire de Magister, université de Tlemcen, 2005.
- [9] A. Ballu, 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, 1993.
- [10] P. Bourdet, F. Schneider, Spécification géométrique des produits cotation e tolérancement ISO, Technique et Ingénierie, Dunod, 2007.
- [11] M. Dursapt, Métrologie dimensionnelle, Dunod, Paris, 2009.
- [12] Dessins techniques, Tolérancement géométrique, Généralités, définitions, symboles, Indications sur les dessins, ISO 1101 (NF E 04-552), AFNOR, 1983.
- [13] M. Aublin, Exploitation de la conception G.P.S et de la normalisation pour la Spécification Géométrique des produits, Centre d'Etudes et de Rénovation Pédagogique de l'Enseignement Technique, Paris, 1999.
- [14] J.A. Bosch, Coordinate Measuring Machines and Systems, CRC Press, 1995.
- [15] E. Pairel, Métrologie fonctionnelle par calibre virtuel sur machine à mesurer tridimensionnelle, Thèse de doctorat en Génie mécanique de l'Université de Savoie (France), 1995.
- [16] F. Boudaouine, P. Lecordier, D. Vasty, Comment choisir le moyen de mesure adapté dans le domaine dimensionnel, EDP Sciences, 2013.
- [17] A. Jolid, S. Hariri, J. P. Senelaer, A. El Gharad, Evaluation des incertitudes de mesure sur une machine à mesurer tridimensionnelle : Nouvelle méthode d'estimation des paramètres de surface et incertitudes associées, 19<sup>ème</sup> congrès français de mécanique, Marseille, 2009.
- [18] T. Coorevits, F. Hennebelle, Typologie et conception des machines à mesurer tridimensionnelle : un état de l'art, 17<sup>th</sup> International Congress of Metrology, 13002, 2015.
- [19] <http://www.directindustry.fr/prod/carl-zeiss-industrielle-messtechnik-gmbh/product-5693-1071357.html>, (site consulté le 02/05/2018).
- [20] L. Gonzalez, Directeur de Renishaw MLZ, Mesures mécanique ,2004.

- [21] G. Asch et Collaborateurs, livre, les capteurs en instrumentation industrielle, 5ème édition, 1999.
- [22] Renishaw, Manuel d'utilisation des systèmes de capteurs à déclenchement, édition 02/2003, France.
- [23] A. Nafi, Vérification et diagnostic des machines à mesurer tridimensionnelles avec découplage machine et palpeur, Université de Montréal, 2011.
- [24] Renishaw, 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, 2003,
- [25] P. Bourdet, Classification des technologies de numérisation 3D, ENS de Cachan, 2010.
- [26] M. Radouani, B. Anselmetti, Application d'un solveur à l'identification de surfaces réelles et au contrôle des spécifications ISO, ENS de Cachan, France, 2003.
- [27] [https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode\\_des\\_moindres\\_carr%C3%A9s](https://fr.wikipedia.org/wiki/M%C3%A9thode_des_moindres_carr%C3%A9s), (Site consulté le 01-02-2018).
- [28] K.H. Khan, Parameter Estimation for the Exponential distribution model Using Least Squares Methods and applying Optimization, International Journal of Modern Engineering Research, IJMER, Volume 7, 2017.
- [29] Q. Paris, The Dual of the Least-Squares Method. *Open Journal of statistics*, Volume 5, 2015.
- [30] C. F. Gauss, *Theoria Motus Corporum Coelestium in Sectionibus Conicis Solem Ambientium*. 1809.
- [31] L. Adrien Marie, *Nouvelles Méthodes pour la Détermination des Orbites des Comètes*, Chez Firmin Didot, Libraire pour la Mathématique, la Marine, l'Architecture, et les éditions stéréotypes, rue de Thionville, Paris, 1805.
- [32] J.T. Betts, Solving the Nonlinear Least Square Problems: Application of a General Method, *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 8, 1976.
- [33] H.L. Harper, The method of least squares and some alternatives, Part I, II, III, IV, V, VI. *International Statistical Review*, (1974–1976).
- [34] H. Abdi, *The Method of Least Squares*, The University of Texas at Dallas USA, Edition Neil Salkind, 2007.
- [35] G. Leborgne, Notes de cours de l'ISIMA, Méthode des moindres carrés : meilleure approximation linéaire, 2005 (<http://ww.isima.fr/~leborgne>).
- [36] J.-P. Marco, L. Lazzarini, *Mathématiques L1 : Cours complet avec fiches de révision, 1000 tests et exercices corrigés*, Pearson, 2013, 2e éd.
- [37] J.P. Ramis, A. Warusfel, X. Buff, J. Garnier, E. Halberstadt, T. Lachand-Robert, F. Moulin, J. Sauloy, *Mathématiques Tout-en-un pour la Licence - Niveau 1* Dunod, 2013.
- [38] [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A8gle\\_de\\_Cramer](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A8gle_de_Cramer), (Site consulté le 14-05-2018).
- [39] [https://fr.wikibooks.org/wiki/Programmation\\_Python/Introduction](https://fr.wikibooks.org/wiki/Programmation_Python/Introduction), (Site consulté le 20/05/2018).
- [40] [https://fr.wikibooks.org/wiki/PyQt/Version\\_imprimable](https://fr.wikibooks.org/wiki/PyQt/Version_imprimable), (Site consulté le 20/05/2018).
- [41] E. Pairel, Three-dimensional metrology with the virtual fitting gauges, 11th CIRP International Conference on Computer Aided Tolerancing, March, 26-27, Annecy, France, (2009).

- 
- [42] E. Pairel, Three-Dimensional Verification of Geometric Tolerances With the “Fitting Gauge” Model, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, Vol. 7, Issue 1, (2007), pp. 26-30..
- [43] E. Pairel, P. Hernandez, M. Giordano, Virtual Gauge Representation for Geometric Tolerances in CAD-CAM Systems, in “Models for Computer Aided Tolerancing in Design and Manufacturing (Selected papers from 9th CIRP seminar on CAT)”, Springer, J.K. Davidson (Ed.) , (2007), pp. 3-12.
- [44] E. Pairel, Présentation d'un logiciel de métrologie tridimensionnelle par calibre virtuel, 12<sup>o</sup> congrès international de métrologie, Lyon, France, 20-23 Juin 2005.
- [45] E. Pairel, The "Gauge model": A New Approach for Coordinate Measurement, XIV IMEKO World Congress, Tampere, Finland, 1-6 June, (1997), pp278-283.
- [46] A. Jalid, S. Hariri, P. Senelaer, A. El Gharad, Comparaison entre la méthode GUM et Monte Carlo pour l'estimation de l'incertitude en mesure 3D : Application dans étude d'une planéité, 22<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, 2015.
- [47] C. Rey, R. Ward, On determining the on-line minimax linear fit to a discrete point set in the plane, *Information Processing Letters* 24, North-Holland, 1987.
- [48] R.L. Graham, An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set, *Information Processing Letters* 1 (4), 1972.

# ANNEXES

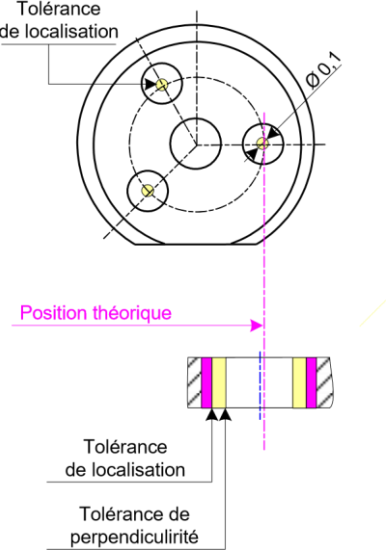
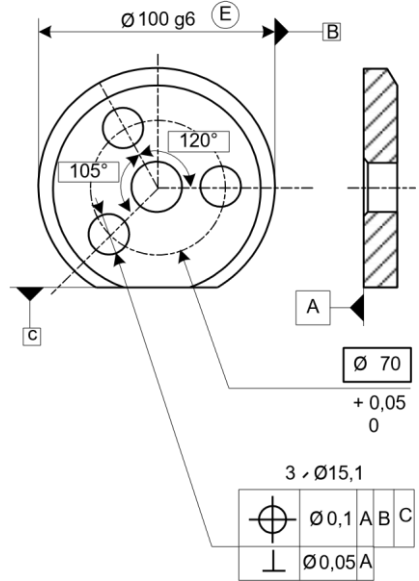
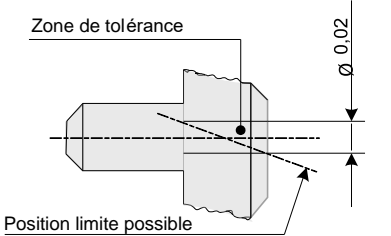
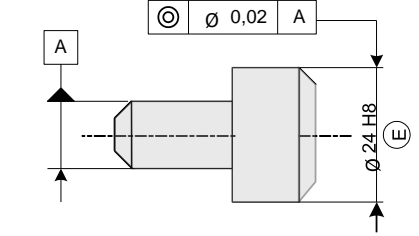
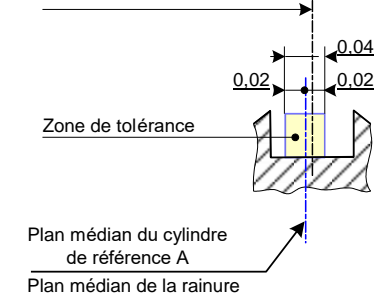
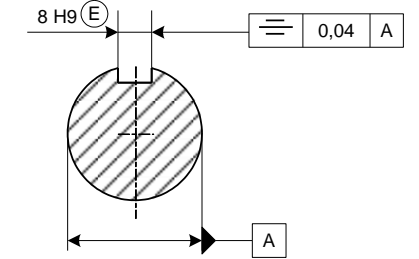
## Annexe A

## Tolérances de forme [8]

| 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 |           |              |             |
| <b>RECTITUDE</b>  |                              |                    |             |           |              |             |
| <p>Une ligne quelconque du plan suivant la direction donnée, doit être comprise entre deux droites parallèles distantes de 0,02.</p> <p>Pour une ligne convexe, les droites sont orientées pour que la valeur h soit minimal.</p> |                              |                    |             |           |              |             |
| <b>PLANEITE</b>   |                              |                    |             |           |              |             |
| <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 plan: voir rectitude.</p>  |                              |                    |             |           |              |             |
| <b>CIRCULARITE</b>  |                              |                    |             |           |              |             |
| <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>                                 |                              |                    |             |           |              |             |
| <b>CYLINDRICITE</b>   |                              |                    |             |           |              |             |
| <p>La surface doit être comprise entre deux cylindres coaxiaux dont les rayons diffèrent de 0,05.</p> <p>Le cylindre extérieur est le plus petit cylindre circonscrit.</p>  |                              |                    |             |           |              |             |
| <b>PROFIL D'UNE SURFACE QUELCONQUE</b>  |                              |                    |             |           |              |             |
| <p>La surface tolérancée doit être comprise entre les deux surfaces qui enveloppent l'ensemble des sphère de <math>\varnothing 0,04</math> centrées sur une surface ayant la forme géométrique théorique exacte.</p>              |                              |                    |             |           |              |             |

## Tolérances d'orientation et de position [8]

|  | Tolérances d'orientation   |              |                  | Tolérances de position |                         |          |
|--|--|--------------|------------------|------------------------|-------------------------|----------|
| SYMBOLE  |  |              |                  |                        |                         |          |
| SIGNIFICATION  | Inclinaison  | Parallélisme | Perpendicularité | Localisation           | Coaxilité 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     |
| <b>Exemple</b>   | <b>Illustration de la tolérance</b>  |              |                  | <b>Application</b>     |                         |          |
| <b>PERPENDICULARITE</b>  |  |              |                  |                        |                         |          |
| La surface tolérancée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,05 et perpendiculaires au plan de référence A.                    | <p>L'axe du cylindre tolérancé doit être compris dans une zone cylindrique de <math>\varnothing</math> 0,02 perpendiculaire au plan de référence A.</p>  |              |                  |                        |                         |          |
| <b>INCLINAISON</b>   |  |              |                  |                        |                         |          |
| 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>La surface tolérancée doit être comprise entre deux plans parallèles distants de 0,05 et parallèles au plan de référence A.</p>   |              |                  |                        |                         |          |
| <b>PARALLELISME</b>  | <p>L'axe du trou doit être compris dans une zone cylindrique de <math>\varnothing</math> 0,1 dont l'axe est dans la position théorique exacte.<br/> A:réfrence primaire (appui plan).<br/> B:réfrence secondaire (orientation).<br/> C:réfrence tertiaire (butée).</p> |              |                  |                        |                         |          |
| <b>LOCALISATION</b>  |  |              |                  |                        |                         |          |

| Exemple   | Illustration de la tolérance   | Application   |                   |   |   |   |         |                    |   |  |
|---|--|---|-------------------|---|---|---|---------|--------------------|---|--|
| <p style="text-align: center;"><b>LOCALISATION</b></p> <p>L'axe d'un trou doit être compris dans une zone cylindrique de <math>\varnothing 0.1</math> dont l'axe est dans la position théorique exacte.<br/> A : référence primaire (appui plan).<br/> B : référence secondaire (linéaire annulaire).<br/> C : référence tertiaire (ponctuelle). On outre, le défaut de perpendicularité de l'axe doit rester compris dans une zone cylindrique de <math>\varnothing 0.05</math> perpendiculaire au plan de référence A.</p> <p>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>Tolérance de localisation</p> <p>Position théorique</p> <p>Tolérance de perpendicularité</p>   |  <p><math>\varnothing 100\text{ g6 (E)}</math></p> <p><math>\varnothing 70</math><br/>+0,05<br/>0</p> <p>3 · <math>\varnothing 15,1</math></p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td><math>\varnothing 0,1</math></td> <td>A</td> <td>B</td> <td>C</td> </tr> <tr> <td><math>\perp</math></td> <td><math>\varnothing 0,05</math></td> <td>A</td> <td></td> </tr> </table> | $\varnothing 0,1$ | A | B | C | $\perp$ | $\varnothing 0,05$ | A |  |
| $\varnothing 0,1$   | A  | B   | C                 |   |   |   |         |                    |   |  |
| $\perp$   | $\varnothing 0,05$   | A   |                   |   |   |   |         |                    |   |  |
| <p style="text-align: center;"><b>COAXIALITE</b></p> <p>L'axe du cylindre <math>\varnothing 24\text{ h8}</math> doit être compris dans une zone cylindrique de <math>\varnothing 0,02</math> coaxiale à l'axe du cylindre de référence A.</p>   |  <p>Zone de tolérance</p> <p>Position limite possible</p> <p><math>\varnothing 0,02</math></p> <p><math>\varnothing 24\text{ h8}</math></p>  |  <p><math>\text{◎ } \varnothing 0,02 \text{ A}</math></p> <p><math>\varnothing 24\text{ h8 (E)}</math></p>   |                   |   |   |   |         |                    |   |  |
| <p style="text-align: center;"><b>SYMETRIE</b></p> <p>Le plan médian de la rainure doit être compris entre deux plans parallèles distants 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>   |  <p>Zone de tolérance</p> <p>Plan médian du cylindre de référence A</p> <p>Plan médian de la rainure</p> <p>0,04</p> <p>0,02</p> <p>0,02</p> |  <p>8 H9 (E)</p> <p><math>\equiv 0,04 \text{ A}</math></p>   |                   |   |   |   |         |                    |   |  |

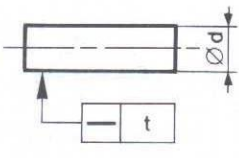
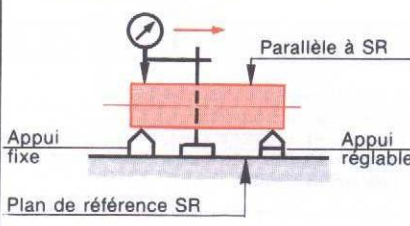
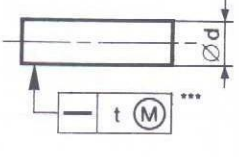
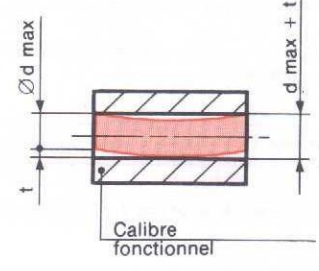
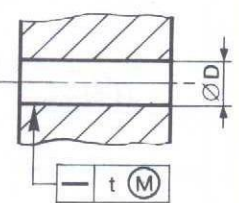
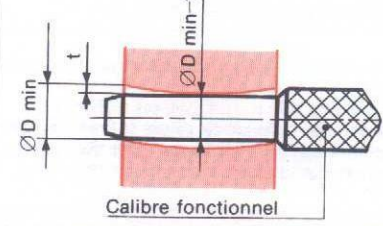
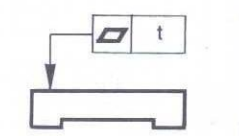
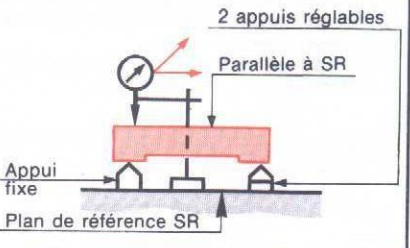
## Tolérances de battement [8]

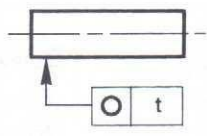
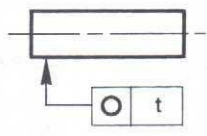
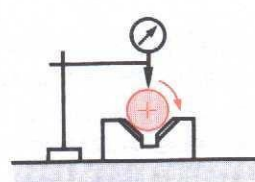
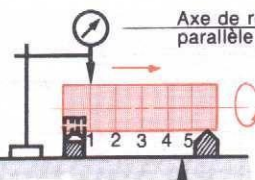
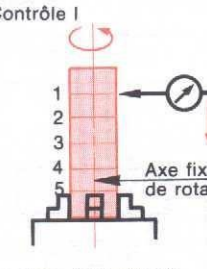
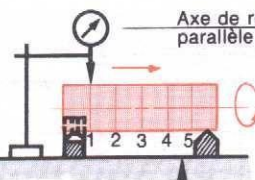
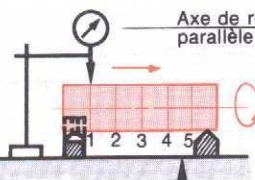
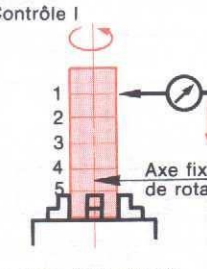
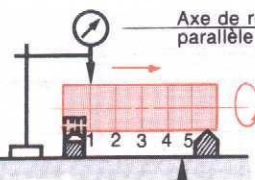
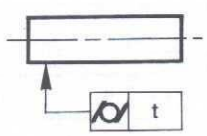
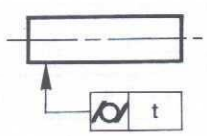
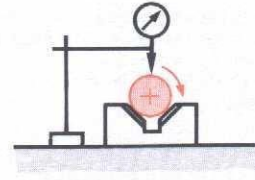
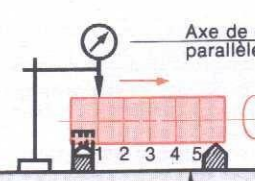
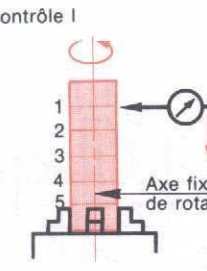
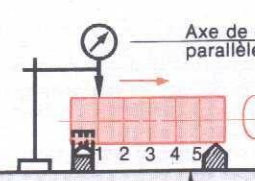
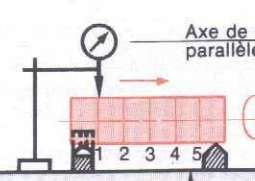
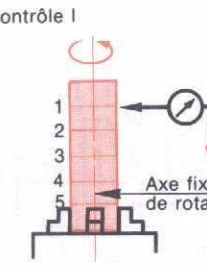
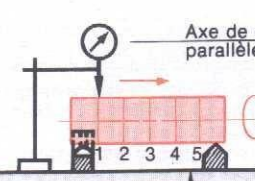
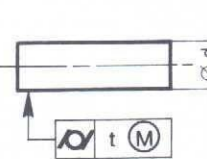
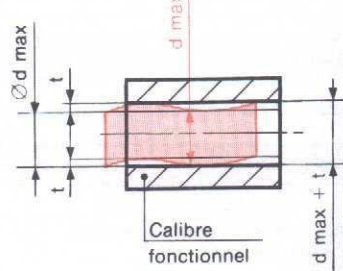
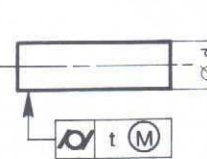
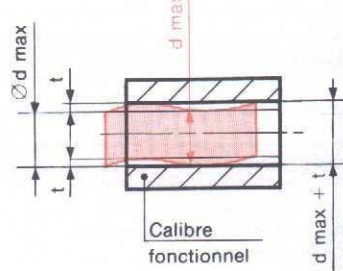
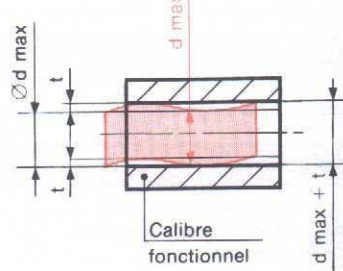
| TOLERANCES DE BATTEMENT   |   |                      |  |
|---|---|----------------------|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Les tolérances de battement s'appliquent aux surfaces de révolution.</li> <li>Les tolérances battement permettent d'exprimer directement les exigences fonctionnelles de surfaces telles que:               <ul style="list-style-type: none"> <li>- flasque d'embrayade, roue de friction, galet de roulement, jante de roue</li> </ul> </li> </ul> | SYMBOLE   |                      |  |
|   | SIGNIFICATION   | Battement circulaire |  |
| EXEMPLE   | ILLUSTRATION DE LA TOLERANCE  | APPLICATION          |  |
| <p><b>Battement circulaire axial</b></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 <math>\varnothing d</math> du cylindre de mesure, la valeur 0,05.</p>   | <p>Pour chaque <math>\varnothing d</math> du cylindre de mesure</p> |                      |  |
| <p><b>Battement circulaire radial</b></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>  | <p>Pour chaque position I du plan de mesure</p>                     |                      |  |
| <p><b>Battement circulaire axial</b></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. Pratiquement, la zone de tolérance est indentique à celle d'une tolérance de perpendicularité.</p>      |   |                      |  |
| <p><b>Battement circulaire radial</b></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>   |   |                      |  |
| <p><b>Battement total dans une direction spécifiée</b></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 B

## Vérifications géométriques [8]

| RECTITUDE   |   |  |
|---|---|--|
| <b>Tolérance</b>  |   |  |
| Une génératrice doit rester comprise entre deux droites distantes de $t$ .  |    |    |
| <b>Contrôle</b>   |   |  |
| Déplacer le comparateur le long de la génératrice. Écart maximal toléré : $t$ . Répéter la mesure sur $n$ génératrices (minimum 3).   |   |  |
| <b>Tolérance</b>  |   |  |
| 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. |    |    |
| <b>Contrôle</b>   |   |  |
| La pièce doit passer dans le calibre fonctionnel.   |   |  |
| <b>Tolérance</b>  |   |  |
| 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.  |   |   |
| <b>Contrôle</b>   |   |  |
| Le calibre fonctionnel doit passer dans la pièce.   |   |  |
| PLANÉITÉ  |   |  |
| <b>Tolérance</b>  |   |  |
| La surface doit être comprise entre deux plans distants de $t$ .  |  |  |
| <b>Contrôle</b>   |   |  |
| Déplacer le comparateur sur toute la surface. Écart maximal toléré : $t$ .  |   |  |

| CIRCULARITÉ   |   |   |
|---|---|---|
| <b>Tolérance</b>  |    | <b>Contrôle II</b>  |
| 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.  |    |    |
| <b>Contrôle I</b>   | <b>Contrôle I</b>   |    |
| Appareil de mesure de la variation d'un rayon autour d'un centre fixe.<br>Écart maximal toléré : $t$ .  |    |    |
| <b>Contrôle II (contrôle approché)</b>  | <b>Contrôle II (contrôle approché)</b>  |    |
| La pièce effectue une rotation complète.<br>Écart maximal par section : $2t$ .<br>Afin de réduire l'influence des défauts de forme, il est conseillé d'effectuer deux fois cette mesure : l'une avec un vé à $90^\circ$ , l'autre avec un vé à $120^\circ$ .  |    |    |
|   | Machine à mesurer *   | Surface de référence SR   |
| CYLINDRICITÉ  |   |   |
| <b>Tolérance</b>  |   | <b>Contrôle II</b>  |
| La surface doit être comprise entre deux cylindres coaxiaux dont les rayons diffèrent de $t$ .  |   |   |
| <b>Contrôle I</b>   | <b>Contrôle I</b>   |  |
| Appareil de mesure de la variation d'un rayon autour d'un axe fixe.<br>Écart maximal toléré : $t$ .   |  |  |
| <b>Contrôle II (contrôle approché)</b>  | <b>Contrôle II (contrôle approché)</b>  |  |
| Relever les déviations pendant une rotation complète sur $n$ sections.<br>Écart maximal entre tous les points des sections : $2t$ .<br>Afin de réduire l'influence des défauts de forme, il est conseillé d'effectuer deux fois cette mesure : l'une avec un vé à $90^\circ$ , l'autre avec un vé à $120^\circ$ . |  |  |
|   | Machine à mesurer *   | Surface de référence SR   |
| <b>Tolérance</b>  |  |  |
| 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 $\varnothing d_{max} + t$ ).<br>Si la pièce n'est pas dans cet état, elle doit rester inscrite dans le même volume.                                       |  |  |
| <b>Contrôle</b>   |   | Calibre fonctionnel   |
| La pièce doit passer dans le calibre fonctionnel.   |   |  |

**Liste des normes**

- [ISO 10360-1] : Spécification géométrique des produits (GPS), Essais de réception et de vérification périodique des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT), Partie 1, ISO, 2000.
- [ISO 10360-2] : Spécification géométrique des produits (GPS), Essais de réception et de vérification périodique des machines à mesurer tridimensionnelles (MMT), Partie 2 : MMT utilisées pour les mesures de dimensions linéaires, 2009.
- [ISO 1101] : Dessins techniques- Tolérancement géométrique- Tolérancement de forme, orientation, position et battement : généralités, définitions symboles, indication sur les dessins. Genève : ISO, 2017.
- [ISO 1660] : Spécification géométrique des produits (GPS), Tolérancement géométrique, Tolérancement des profils, 2017.
- [ISO 2692] : Spécification géométrique des produits (GPS), Tolérancement géométrique, Exigence du maximum de matière (MMR), exigence du minimum de matière (LMR) et exigence de réciprocité (RPR), 2014.
- [ISO 3040] : Spécification géométrique des produits (GPS), Cotation et tolérancement, Cônes, 2016.
- [ISO 5458] : Spécification géométrique des produits (GPS), Tolérancement géométrique, Spécification géométrique de groupes d'éléments et spécification géométrique combinée, 2018.