

CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE ET A LA MODELISATION DES PARAMETRES INFLUANT SUR LA CAPABILITE DES PROCEDES DE MESURE TRIDIMENSIONNELS

Gabriel Cloitre

▶ **To cite this version:**

Gabriel Cloitre. CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE ET A LA MODELISATION DES PARAMETRES INFLUANT SUR LA CAPABILITE DES PROCEDES DE MESURE TRIDIMENSIONNELS. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université du Sud Toulon Var, 2000. Français. NNT : . tel-00740375

HAL Id: tel-00740375

https://theses.hal.science/tel-00740375

Submitted on 10 Oct 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE de TOULON et du VAR
U.F.R DE SCIENCES ET TECHNIQUES

N° attribué par la bibliothèque

/ / / / / / / / / /

THESE

Pour obtenir le grade

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE TOULON ET DU VAR

Discipline: Sciences et Techniques en Génie Mécanique

Présentée et soutenue publiquement

Par

Gabriel CLOITRE

Le: 25 janvier 2000

CONTRIBUTION A LA CONNAISSANCE ET A LA MODELISATION DES PARAMETRES INFLUANT SUR LA CAPABILITE DES PROCEDES DE MESURE TRIDIMENSIONNELS

Directeur de thèse **: Serge TORBATY Professeur Université de Toulon et du Var**

Gratian STETIU Professeur Université Sibiu Roumanie**. Rapporteur**
Bruno-Marie BECHARD Professeur Université de Sherbrooke Canada **Rapporteur**
Pierre BOURDET Professeur Université Ecole Normale Supérieure Cachan R**apporteur**
Serge TICHKIEWICH Professeur Institut National Polytechnique Grenoble **Rapporteur**
Michel WEILL Professeur Université de Toulon et du Var
Patrice CHOLLET Maître de Conférences Centre Etudes Supérieures Techniques Industrielles Toulon
Jean Marc LINARES Maître de Conférences Institut Universitaire de Technologie d'Aix en Provence

" La soumission implique la possibilité de l'arrogance et de la révolte"

R.Caillois, L'Homme et le Sacré, 1939

A ma femme Renée
A mes filles Claudine et Cécile
A la mémoire de mon père

Remerciements

Toutes les mesures qui suivent ont été réalisées dans le laboratoire de Métrologie dimensionnelle de L'Institut Universitaire de Technologie de Toulon et plus précisément dans le département Génie Mécanique et productique.
Je remercie le Directeur actuel Monsieur le Professeur Bruno ROSSETTO pour la considération qu'il a témoigné envers mes travaux et son prédécesseur, Monsieur Pierre LOUBET qui a su, par ses encouragements, me donner le courage et la volonté d'aller au bout de mes idées.

Je suis particulièrement honoré de la présence du Professeur Bruno-Marie BECHARD du département Génie Mécanique, vice Recteur de l'université de Sherbrooke, qui est venu de la belle province du Québec pour faire partie de ce jury et d'en être rapporteur.

Je tiens à remercier chaleureusement le Professeur Pierre BOURDET, Directeur du Laboratoire Universitaire de Recherche en Production Automatisée de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan (ENS Cachan) Métrologue de grande renommée, pour le très grand honneur qu'il m'a fait en acceptant la lourde tâche de rapporteur.

J'adresse mes plus vifs remerciements au Professeur Serge TICHKIEWITCH de l'Institut Polytechnique de Grenoble pour ses conseils et sa disponibilité comme rapporteur.

Je remercie chaleureusement le Professeur Michel WEILL pour m'avoir fait l'honneur et l'amitié d'être membre de ce jury.

Je tiens à remercier Monsieur Patrice CHOLLET maître de conférence au Centre d'Etudes Supérieures des Techniques Industrielles de Toulon pour avoir accepté de prendre sur son temps de lire et de me conseiller dans un domaine ou ses compétences sont unanimement reconnues.

Ma reconnaissance et mon amitié à Jean Marc LINARES maître de conférences à l'Institut Universitaire d'Aix en Provence pour son aide et pour avoir accepté d'être membre du jury.

Mes remerciements à Monsieur Jean Claude BELLONE Ingénieur en Chef des Etudes et Techniques de l'Armement, ancien responsable à la Direction Qualité des Arrondissements de Toulon et de Marignane, et pour qui la Qualité et la Métrologie furent son "quotidien" durant toute son activité.

Je remercierai également Monsieur Bernard SCHATZ Ingénieur en Métrologie au Laboratoire National D'Essais et Directeur de la Société METROQUAL à Nîmes, que j'ai toujours considéré comme un des messieurs "Métrologie" en France.

Je témoignerai enfin une profonde gratitude à mes directeurs de thèse, le premier le Professeur Serge TORBATY, qui a officiellement dirigé mes travaux, pour les excellents conseils et pour la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de mes expérimentations, et au Professeur Gratian STETIU de l'Université roumaine de SIBIU, pour m'avoir officieusement et par amitié fait bénéficier de toutes ses compétences et tout son savoir et qui me procure une immense joie d'être parmi nous aujourd'hui.
Tous deux ont su trouver les mots pour me décider à entreprendre un travail qui va couronner une carrière d'enseignant issu du monde industriel.

Enfin je remercierai tous mes collègues du département et en particulier messieurs Michel GRIMALDI, Alain CIZERON et Didier CLEMENT pour leur aide et leurs conseils précieux ainsi que Didier COLAS et Jacques TOLZA du département Génie Electrique pour leur amical concours.

Un salut particulier à monsieur Antonio MAZZEI Directeur du laboratoire de métrologie de l'Institut Méditerranéen de la Qualité et à mes amis techniciens de ce laboratoire qui m'ont spontanément apporté leurs compétences pour la vérification et les mesures comparatives que j'ai du effectuer.

Je ne saurai enfin oublier dans ces remerciements mon épouse Renée qui a fait preuve de beaucoup d'indulgence et de patience à mon égard pendant toute la durée de cette recherche.

TABLE DES MATIERES

Table des matières 5
Table des illustrations 10
Tableaux 10
Figures 13
Graphiques 14
Photos 16
1-1-Historique [30] ,[35] 19
1-2-Bibliographie 20
Etat de l'Art 20
1-2-1 La métrologie et le contrôle. [10] 20
1-2-2 Les normes ISO 9000 20
1-2-2-1-Rappels sur les normes ISO 9000. [26],[29] 20
1-2-1-1- Analyse des exigences d'assurance de la qualité des normes ISO 9000. 22
1-2-1-3- Etre certfié ISO 9000 25
1-2-1-5- Histoire de la machine à mesurer : [25] 26
1-2-1-6- Evolution : 27
1-2-1-7- Conclusions 29
1-2-3- Les travaux déjà effectués 30
Méthode de calcul des incertitudes [28] ,[75] 41
1-Introduction 41
Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure 43
1)Extrait de la norme NFX07-020 (juin 96) 43
2)Méthode de calcul : 43
3) Procédure proposée pour l'établissement des formules d'incertitudes dans les opérations d'étalonnage 44
4) Calcul de l'incertitude globale 45
1-2-4-Conclusions : 47
1-2-5-Objectifs des travaux qui vont suivre : 48
2-1 Etude expérimentale : Détermination de la taille des echantillons 49
2-1-1-Type de machine utilisée : 49
2-1-1-1- Description générale sommaire 49
2-1-1-2- Les incertitudes de mesure dans ce type de chaîne de mesure : 51
2-2-1- Que manque-t-il actuellement après les différents travaux effectués 52
2-2-1-1-Définition de l'indice de capabilité : 52
2-2-1-2- Détermination de l'incertitude de mesure 52
2-2-1-3- Rapport entre l'incertitude type (is) et la tolérance spécifiée (t) 52
2-2-1-4- Critère de décision de conformité du produit 53
2-3-1-Objectifs 53
2-3-1-1- Utilisation des statistiques 54
2-3-1-2- Détermination de la taille de l'échantillon (n) 54
2-3-1-3- Conditions de mesure : 54

2-4-1 Variation du rayon dynamique du palpeur..... 60
2-4-1- 1- Réalité d'une loi normale..... 60
2-4-1-2 Intervalle de confiance de la moyenne..... 60
2-5-1- Méthode pour tracer de la loi normale réduite avec les limites de classe de l'histogramme. 61
2-6-1--Test du khi-deux..... 64
2-6-2- Conclusions : 66
2-7-1- Test de Shapiro-Wilk [34] [50]..... 66
2-8-1- Test de Kogomorov-Smirnov [34] [50] 71
2-9-1- Cent qualifications caractérisent la population mère..... 72
2-9-1-1--Incertitude sur la moyenne de l'échantillon pris comme population mère (risque à 5 %) : 72
2-9-1-2-Pourquoi une différence entre les valeurs moyennes des rayons entre les trois tests ? 77
2-10-1- récapitulatifs sur les variations :..... 79
2-11-1- Evolution des résultats en fonction du nombre de qualifications..... 81
2-12-1- Conclusions générales du chapitre 2:..... 83
3-1- Etude expérimentale sur la qualification du palpeur et modélisations des résultats 84
3-1-1-Objectifs..... 84
3-2-1-Introduction..... 84
3-3-1-Influence du nombre de points de palpage et de la vitesse dans l'opération qualification. 85
3-3-1-1-La qualification palpeur est primordiale en mesure 3D. 85
3-4-1-Qualification en 9 points avec accostage normal :..... 86
3-5-1-Qualification avec accostage normal en 5 points :..... 87
3-5-2-Conclusion sur l'influence de la vitesse sur les écarts type :..... 89
3-6-1-Influence de la vitesse sur la qualification :..... 90
3-7-1- Accostage quelconque en 5 points :..... 91
3-7-2- Conclusions générales sur le chapitre 3:..... 92
3-8-1-Erreurs dues à l'orientation de la tête de mesure..... 92
3-8-1-1 Rotation de la tête de 0 à 105°pour l'angle α..... 93
Conclusions générales sur le chapitre 3-8..... 101
3-8-1-2- Rotation de la tête de -180° à +180° pour l'angle β..... 101
3-8-2-3- Evolution du rayon du palpeur :..... 103
3-8-2-4- Evolution des x : (centre de la sphère de référence)..... 104
3-8-2-5-Evolution des y : (centre de la sphère de référence)..... 104
3-8-2-6-Evolution des z : (centre de la sphère de référence)..... 105
3-8-2-7- autre manière de poser le problème 105
Conclusions générales sur le chapitre 3-8-2..... 109
3-9-2-Variations des différents paramètres : 109
3-9-2-1-Influence de la longueur du palpeur et de la vitesse d'accostage ... 110
Conclusions partielles sur le tableau n°3-14 et sur le graphique 3-15 112
3-9-2-2-choix définitif sur les équations de l'influence de la vitesse sur le rayon dynamique : 114
Conclusion partielle :..... 115
Conclusions : 120
3-4-2-2-7-Conclusions partielles sur le chapitre 3-4-2 : 125
3-9-2-2-10-Récapitulatif sur l'influence des paramètres longueur et vitesses.125
Comment minimiser ces incertitudes:..... 127

Conclusions partielles sur le chapitre 3-2-2 129
3-10-1-Abaque général permettant de donner une incertitude globale suivant la longueur et la vitesse des palpeurs en qualification. 130
3-10-1-1-Conclusions partielles sur le chapitre n°3: 130
3-11-1- Influence du diamètre de la bille de palpage. 131
3-11-2-Conclusions sur le chapitre 3-11-1 134
4-1- ETUDE EXPERIMENTALE SUR LA MESURE DES ELEMENTS DE BASE ET MODELISATION DES RESULTATS 135
4-1-1- Objectifs 135
4-1-2- Introduction 135
4-2-1- Mesure d'un point : 136
4-2-1-1-Conclusions : 138
4-2-2 Mesure d'une droite 139
4-2-3- Objectifs 139
4-2-3-1 - Différentes mesures effectuées : 139
4-2-3-2- Procédure 140
4-2-3-3-Conclusions générales sur la mesure d'une droite : 142
4-3-1 Mesure d'un plan 143
4-3-2- Procédure 143
4-3-3- Objectifs 143
4-3-3-1- 1ere procédure : 143
4-3-3-2- 2eme procédure 145
Procédure modifiée : 146
4-3-3-3-Conclusions sur la mesure d'un plan : 152
4-4-1 mesure d'un cercle 153
4-4-2- Procédure 153
4-4-3- Objectifs 153
4-4-4- méthode de mesure du cercle 153
4-4-4-1- Principe de mesure 155
première série de mesures 155
1ere conclusion : 156
4-4-4-2-Conclusions partielles : 159
4-4-4-3-Retrouve-t-on un défaut équivalent sur la mesure d'autres bagues de diamètres équivalents ? 161
2eme série de mesures 162
4-4-4-5-Conclusions générales du paragraphe n° 4-4-4 166
4-4-4-6- Une nouvelle procédure de qualification du rayon dynamique de la bille de palpage. 168
4-4-4-7-Conclusions particulières sur le chapitre 4-4-4 169
4-5-1 mesure de la sphère 170
4-5-2- Procédure 170
4-5-3- Objectifs 170
4-5-4- principe de mesure d'une sphère : 170
4-5-4-1- Influence du nombre de points : 171
Conclusions partielles 174
4-5-4-2- Influence de la vitesse. 174
Conclusions: 177
Ig(coord)=± 0.0032mm (avec k=2) 178
Ig(sphéricité)=0.0045 ± 0.0011 mm 178

Equation générale de la variation du diamètre en fonction de la vitesse en % : (graphique n°4-1-73 179
4-6-1-Tableau récapitulatif des incertitudes sur les mesures d'éléments(vitesse 1.6m/mn) 181
4-7-1-mesure d'une pièce test: 182
4-7-1-1-Introduction : 182
4-7-2 Objectifs : 182
4-7-2-1-Comment situer la machine utilisée par rapport au parc actuel..... 182
5-1- Proposition d'un modèle de calcul des incertitudes et des capabilités sur MMT 185
5-1-1-Méthodologie du calcul d'incertitude globale et du calcul de capabilité : 185
5-1-2- Utilisation des résultats des chapitres 3 et 4 187
5-1-3- Calculs : 189
5-1-4-Conclusions : 192
5-1-6-Exemple de tableau complet : 193
5-2-Modélisation par logiciel permettant de globaliser tous ces calculs 195
5-3-Validation 199
6-1 Conclusions générales 200
6-2 Perspectives 201
Bibliographie 202
Annexe A: 212
1-1 La mesure à l'aide des machines à mesurer 212
1-1-1 Les machines à mesurer 212
1-1-2-Conclusion : 217
1-1-2-Constitution d'une machine à mesurer : 218
1-1-3- Le contrôle avant l'utilisation des machines à mesurer tridimensionnelle :218
1-1-4-Avantages des MMC sur le contrôle sur marbre : 219
1-1-5- Principe de mesure : 219
Les calculs de chaque élément font appel à des calculs basés sur le calcul des moindres carrés ou une autre méthode d'optimisation spécifique comme la " méthode Tchébyshef ". 220
1-1-6-Avantages de l'alignement par calcul mathématique : 220
1-1-7-Qualification palpeurs : 223
1-1-8-Différents types de palpeurs : 225
1-1-9-Type de calculs effectués à l'aide des moyens informatiques de la machine. 228
1-1-10-Conclusions. 229
1-2-1- La machine utilisée 230
1-2-2-Le logiciel utilisé 231
1-2-3- Méthode de réalisation d'une gamme de mesure : 232
1-1-4-Les parties importantes du programme sont : 235
ANNEXE B 240
Extrait Norme NFX07-001 décembre 1994 [19] 240
2-1-1- Grandeurs et unités 240
2-1-2- Mesurages 241
2-1-3- Résultats de mesure 242
2-1-4- Instruments de mesure 243
2-1-5- Caractéristiques des instruments de mesure. 244
2-1-6- Etalons 245
ANNEXE C 247

3-1-Utilisation des statistiques : 247
3-1-1- Introduction 247
3-1-2- rappels sur les notions de probabilité [36] 247
3-1-3-Fonction de répartition et densité de probabilité : 248
densité de probabilité uniforme. 249
3-1-4-Application: 251
3-1-5-Méthode de calcul pour l'utilisation de la loi normale réduite : [33] 251
3-1-6- Densité de probabilité de la loi normale réduite 253
3-1-7- Fonction de répartition de la loi normale réduite 255
3-1-8-Valeurs particulières importantes : 257
3-1-9-Calculs de μ ET σ(x) sur une population mère (N) 258
Annexe D 260
4-1-1-Incertitudes de mesure : 260
4-1-2- Bilan des erreurs 261
1) Erreurs dues à l'instrument de mesure : 261
2) Erreurs dues aux conditions de mesure : 261
3) Erreurs dues aux opérateurs : 261
4) L'élément mesuré : 262
4-1-3-Méthode de calcul des incertitudes [28] 262
1-Introduction 262
4-1-4- Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure 264
1)Extrait de la norme NFX07-020 (juin 96) 264
2)Méthode de calcul : 265
3) Procédure proposée pour l'établissement des formules d'incertitudes dans les opérations d'étalonnage 266
4) Calcul de l'incertitude globale 267
6)Calcul de l'incertitude globale de mesure Ig 269
Annexe E 270
5-1- la capabilité des moyens de mesure 270
5.1-1- Introduction 270
5-1-2. Indice de capabilité des moyens de mesure (C.M.M.) 275
Annexe f 281
1Extraits de la norme NFE 02-204 [14] 281
6-1-1-Introduction 281
1) Domaine d'application 281
2) Références 282
3- Symboles et définitions 282
6-1-2-Définitions 282
3-2-3 Résultat d'un mesurage : 283
3-2-4 Incertitude de mesure : 283
3-2-5 incertitude type (is) : 283
3-2-6 non-conformité : 283
6-1-3- Règles 283
Détermination de l'incertitude de mesure 283
Rapport entre l'incertitude type (is) et la tolérance spécifiée (t) 283
Critère de décision de conformité 284
Litiges 284
Annexe G : 286
Annexe H 289
7-1-Programmes de mesure 289

7-1-1-Programme n°1 qualification sur une sphère en 19pts: 289
7-1-2-Programme n°2 qualification sur une sphère variation de A de 0° à 90 ° de 7.5° en 7.5°:..... 291
7-1-3-Programme n°3 mesure d'une droite en 100 points..... 293
7-1-4-Programme n°4 mesure d'un plan en 100 points..... 294
7-1-5-Programme n°5 mesure d'une bague en 100 points..... 295
7-1-6-Programme n°6 mesure d'une sphère en 91 points..... 296
7-1-7-Programme n°7 mesure d'une pièce test (intercomparaison) 298

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Tableau n°1 1 NFE 11-150..... 38
Tableau n°1 2 erreurs décomposées..... 40
Tableau n°1 3 Résultats pour X=500 mm, Y=400 mm, Z =300 mm 40
Tableau n°1 4 Intercomparaison EUROMET..... 47
Tableau n°1 5 Après intercomparaison avec objet virtuel..... 47

Tableaux

tableau n°2 1 résultats des 30 qualifications..... 56
tableau n°2 2 (65 mesures)..... 58
tableau n°2 3 (100 mesures)..... 59
tableau n°2 4 effectif théorique et expérimental..... 63
tableau n°2 5 tracé de la courbe théorique et calcul du khi² pour un intervalle de classe (cell) = 0.000125..... 64
tableau n°2 6 Table des coefficients ai pour le test W de shapiro-Wilk..... 68
tableau n°2 7 table des valeurs limites..... 68
tableau n°2 8 test de Shapiro-Wilk..... 70
tableau n°2 9 test de Kolgomorov-Smirnov..... 71
tableau n°2 10 table B5..... 72
tableau n°2 11 Récapitulatif des variations sur les moyennes ::..... 79
tableau n°2 12 Récapitulatif sur les variations des écarts type..... 79
tableau n°2 13 récapitulatif des moyennes et des écarts type en fonction du nombre de qualifications..... 82

tableau n°2 1 résultats des 30 qualifications..... 56
tableau n°2 2 (65 mesures)..... 58
tableau n°2 3 (100 mesures)..... 59
tableau n°2 4 effectif théorique et expérimental..... 63
tableau n°2 5 tracé de la courbe théorique et calcul du khi² pour un intervalle de classe (cell) = 0.000125..... 64
tableau n°2 6 Table des coefficients ai pour le test W de shapiro-Wilk..... 68
tableau n°2 7 table des valeurs limites..... 68
tableau n°2 8 test de Shapiro-Wilk..... 70
tableau n°2 9 test de Kolgomorov-Smirnov..... 71

tableau n°2 10 table B5 72
tableau n°2 11 Récapitulatif des variations sur les moyennes : 79
tableau n°2 12 Récapitulatif sur les variations des écarts type : 80
tableau n°2 13 Récapitulatif des moyennes et des écarts type en fonction du nombre de qualifications 82

tableau n°3 1 Résultat de la qualification en 9 points 86
tableau n°3 2 Ecarts type sur un palpeur de 50mm en 9 points 88
tableau n°3 3 évolution des écarts type en fonction de la vitesse d'accostage 89
tableau n°3 4 variation du défaut de sphéricité 90
tableau n°3 5 Tableau comparatif sur les écarts type entre les qualifications automatique et manuelle. 91
tableau n°3 6 Variation du rayon en automatique et en manuel 91
tableau n°3 7 Mesure d'une sphère sur les positions α de 0 à 105° 97
tableau n°3 8 longueur du palpeur 98
tableau n°3 9 Résultats des qualifications pour α =0° à 90° 99
tableau n°3 10 variations des écarts type en fonction de l'angle □ 99
tableau n°3 11 Rotation de la tête de β =-180° à + 180° 102
tableau n°3 12 Exemple de mesure à -180°. 106
tableau n°3 13 (13 positions valeurs en mm) 107
tableau n°3 14 influence de la longueur du palpeur en fonction de la vitesse d'accostage 110
tableau n°3 15 Influence de la longueur 112
tableau n°3 16 Equations des pentes des autres palpeurs 113
tableau n°3 17 hypothèse 1 114
tableau n°3 18 Hypothèse 2 115
tableau n°3 19 variation des écarts type en fonction de la vitesse 116
tableau n°3 20 Valeurs des Is1, Is2, Is3, Is en fonction de la vitesse 117
tableau n°3 21 écarts entre les valeurs expérimentales et les modèles mathématiques choisis 119
tableau n°3 22 tableau récapitulatif des équations des rayons 120
tableau n°3 23 variation des écarts type en fonction de la vitesse : 121
tableau n°3 24 tableau des écarts type pour un palpeur de 10 mm(valeurs en micromètres) 122
tableau n°3 25 tableau des écarts type pour un palpeur de 20 mm 122
tableau n°3 26 tableau des écarts type pour un palpeur de 30 mm 122
tableau n°3 27 tableau des écarts type pour un palpeur de 40 mm 122
tableau n°3 28 tableau des écarts type pour un palpeur de 50 mm 123
tableau n°3 29 tableau des écarts type moyens pour les différents palpeurs 123
tableau n°3 30 valeurs de Is1,Is2,Is3 123
tableau n°3 31 Is moyen 124
tableau n°3 32 Equations de Is1, Is2, Is3, Is en fonction de la longueur 125
tableau n°3 33 Equations en fonction de la longueur 125
tableau n°3 34 Is en fonction de la vitesse 126
tableau n°3 35 Récapitulatif des équations des différents palpeurs en fonction des vitesses d'accostage (valeurs de Is). 126
tableau n°3 36 Rayon du palpeur avec son incertitude globale à ± 2 Is. 127
tableau n°3 37 Incertitude à ± 2 Is en fonction de la longueur et de la vitesse 127
tableau n°3 38 Tableau récapitulatif des écarts type en fonction de la vitesse 128
tableau n°3 39 Equations de Is1,is2,Is3 128

tableau n°3 40 valeurs calculées 129
tableau n°3 41 Influence du diamètre de la bille de palpage 131

tableau n°4 1 Variation de la moyenne et de l'écart type sur des matériaux différents de la mesure d'un point 136
tableau n°4 2 Variation de la rectitude sur 30 mesures en fonction du nombre de points 140
tableau n°4 3moyenne des défauts 141
tableau n°4 4 exemple des résultats sur série(*) de 30 mesures de la planéité de 100 points : 144
tableau n°4 5 Récapitulatif des résultats sue la planéité en fonction du nombre de points : 145
tableau n°4 6 Résultats de la mesure d'un plan pour 100 mesures sur 90mm x 90mm. 146
tableau n°4 7tableau de mesure du plan en fonction du nombre de points. 148
tableau n°4 8 mesure bague en 100 pts 156
tableau n°4 9 exemple 157
tableau n°4 10 calcul de l'écart 158
tableau n°4 11 calcul des écarts optimisés ei 159
tableau n°4 12 résultats 159
tableau n°4 13 mesure de bagues de 17,25,35,70,90 165
tableau n°4 14 mesure d'une bague en 100 points de 90mm en fonction de la vitesse. 162
tableau n°4 15 Evolution des critères en fonction du nombre de points 164
tableau n°4 16 Meure bague 40 avec correction rayon dynamique 168
tableau n°4 17 mesure bague 90 après correction du rayon dynamique 169
tableau n°4 18 différents paramètres en fonction du nombre de points de mesure. 172
tableau n°4 19 écarts type en fonction du nombre de points de mesure. 172
tableau n°4 20 Influence de la vitesse sur les différents paramètres 175
tableau n°4 21 Influence de la vitesse sur les écarts type 175
tableau n°4 22 variations des diamètres en fonction des vitesses 178
tableau n°4 23 incertitude sur une sphère de 29.369 179
tableau n°4 24 incertitudes globales 181

tableau n°5 1 188
tableau n°5 2 188
tableau n°5 3 Qualification palpeur : 193
tableau n°5 4 mesure d'éléments 193
tableau n°5 5Tableau des résultats 194

tableau n°A 1Palpeurs utilisés *226*

tableau n°B 1Unités de base *240*
tableau n°B 2Unités dérivées *241*

tableau n°C 1 calcul de la densité de probabilité de u = 0 à u = 4 ..... *253*
tableau n°C 2 valeur de la probabilité (fonction de répartition) pour une valeur de u *255*
tableau n°C 3 Valeurs particulières *257*
tableau n°C 4 Valeurs pour des intervalles *257*
tableau n°C 5 Symboles *259*

tableau n°D 1 Tolérance mesurable pour les appareils courants *260*

tableau n°F 1 Symboles *282*

Figures

fig n°1 1 La machine UMM500 de ZEISS 27
fig n°1 2 Zones de tolérances simples 31
fig n°1 3 zone composée d'éléments simples 32
fig n°1 4 architecture d'une nouvelle MMT 33
fig n°1 5 l'influence sur la répétabilité de la position du portique par rapport à l'axe moteur. 33
fig n°1 6 MMT de la société Game Ingéniérie 35
fig n°1 7 barre et coulisseau 36
fig n°1 8 Vecteur de l'erreur non corrigée 37

fig n°4 1 Procédure 140
fig n°4 2 Orientation de 30° suivant x du plan optique 150
fig n°4 3 Orientation de 30° suivant y du plan optique 151
fig n°4 4 Principe de contrôle de la circularité 154
fig n°4 5 Exemple de mesure d'un cercle en 6 points avec le logiciel Wtutor 154
fig n°4 6 Méthode de calcul 155
fig n°4 8 Mesure d'une sphère en n points 171
fig n°4 9 La pièce test 183

fig n°5 1 Zone d'acceptation et de refus 186
fig n°5 2 Tolérances modifiées 187
fig n°5 3 Application 187
fig n°5 4 Application 193
fig n°5 5 Valeurs des incertitudes de type A 197

fig n°A 1 Machine à portique *213*
fig n°A 2 Tête dynamique à déclenchement de Rénishaw *214*
fig n°A 3 Tête mesurante de Leitz *215*
fig n°A 4 La machine à table coulissante développée par la société LEITZ *216*
fig n°A 5 La machine UMM 500 de la société ZEISS *217*
fig n°A 6 repère machine et repère pièce *220*
fig n°A 7 Mesure d'une pièce sur la machine. *221*
fig n°A 8 Différence sur la position du centre suivant le nombre de points mesurés *223*
fig n°A 9 Coordonnées palpeur et coordonnées du contact palpeur / pièce *224*
fig n°A 10 Influence de la normale de palpage *224*
fig n°A 11 Normale provisoire et normale définitive *225*
fig n°A 12 les palpeurs *225*
fig n°A 13 exemple d'utilisation du palpeur étoile *226*
fig n°A 14 le palpeur de diamètre 1 longueur stylet 10mm *227*
fig n°A 15 Le palpeur étoile de diamètre 2 longueur 68 ..... *228*
fig n°A 16 Exemple de référentiel construit à partir d'éléments virtuels *228*
fig n°A 17 la machine DEA utilisée (modèle gamma 1101) *230*
fig n°A 18 page d'écran des mesures d'éléments de wtutor *232*

fig n°A 19 trajectoire du palpeur pour la mesure d'un plan *233*
fig n°A 20 page d'écran d'un programme de wtutor *236*
fig n°A 21 Mesure d'un plan en 8 points, avec le palpeur n°1, rayon dynamique 1.9983, la machine est en attente du premier point. *237*
fig n°A 22 Page de résultats de la mesure d'un plan *238*

fig n°C 1 densité de probabilité *249*
fig n°C 2 Fonction de répartition *249*
fig n°C 3 Fonction de répartition (ou cumulative) de la loi normale réduite *250*
fig n°C 4 Densité de probabilité de la loi normale réduite *250*
fig n°C 5 Loi normale (paramètres) *251*
fig n°C 6 équation de la loi normale réduite centrée *252*
fig n°C 7 calcul de la densité de probabilité *252*
fig n°C 8 équation de l'aire d'une surface dans une loi normale. *254*
fig n°C 9 loi normale réduite *255*
fig n°C 10 valeur de la probabilité pour une valeur particulière x= 25.3mm *257*
fig n°C 11 estimation en pourcentage pour des valeurs spécifiques *257*

fig n°E 1 loi normale réduite *272*
fig n°E 2 Proportion d'individus HT *272*
fig n°E 3 Tolérance supérieure et inférieure *273*
fig n°E 4 Tolérances modifiées *274*
fig n°E 5 Processus modifié *275*
fig n°E 6 calcul du CMM *276*
fig n°E 7 valeur lue à 40 mm *277*
fig n°E 8 valeurs lues à 39.98 et 40.02mm *278*
fig n°E 9 valeurs lues à 39.97 et 40.03mm *278*
fig n°E 10 Modification des tolérances *279*

fig n°F 1 zone d'acceptation et de refus en fonction de la tolérance *284*
fig n°F 2 : exemple de zone d'acceptation et de refus en fonction de la tolérance *285*

Graphiques

graphique n°2 1 Evolution du rayon sur 100 qualifications 78
graphique n°2 2 Evolution du rayon sur 30 qualifications 78
graphique n°2 3 variations du rayon en fonction du nombre de qualifications : 30,65,100. 81
graphique n°2 4 variation du rayon dynamique en fonction du nombre de qualifications (de 10 à 100 qualifications) : 82
graphique n°2 5 évolution des écarts type en fonction du nombre de qualifications : 83

graphique n°3 1 évolution des écarts type en fonction de la vitesse d'accostage 87
graphique n°3 2 évolution des écarts type en fonction de la vitesse d'accostage 88
graphique n°3 3 variations du rayon en fonction de la vitesse 90
graphique n°3 4 variation du rayon dynamique en fonction de l'angle α 99
graphique n°3 5 variations de l'écart type du rayon en fonction de l'angle α. 100
graphique n°3 6 variation des écarts type 101

graphique n°3 7 évolution du rayon dynamique de -180° à +180°.....103
graphique n°3 8 evolution de x suivant l'angle β.....104
graphique n°3 9 Evolution de y suivant l'angle β.....104
graphique n°3 10 Evolution de z suivant l'angle □.....105
graphique n°3 11 Evolution du rayon dynamique sur 30 qualifications pour β=-180°...107
graphique n°3 12 variations des écarts type pour l'angle β.....108
graphique n°3 13 variation du rayon dynamique......108
graphique n°3 14 variation de la sphéricité :.....109
graphique n°3 15 Influence de la longueur du palpeur en fonction de la vitesse d'accostage......111
graphique n°3 16 Evolution d'un palpeur de 10 à 50mm en fonction de la longueur.....113
graphique n°3 17 Evolution générale.....114
graphique n°3 18 -hypothèse 1 et 2 sur palpeur longueur 10 mm.....115
graphique n°3 19 Equations des palpeurs longueur 10 mm à 50 mm(valeur des rayons dynamiques).....116
graphique n°3 20 Incertitude type sur un palpeur de 10 mm.....118
graphique n°3 21 évolution des écarts type en fonction de la vitesse sur un palpeur de 10mm......119
graphique n°3 22 Hypothèses 1 et 2.....120
graphique n°3 23 Variation des Is1,Is2,Is3 en fonction de la longueur.....124
graphique n°3 24 Equations de Is moyen en fonction de la longueur......124
graphique n°3 25.Evolution de Is pour les différents palpeurs.....126
graphique n°3 26 Evolution de Is1,Is2,Is3 en fonction de la vitesse.....128
graphique n°3 27 Abaque des incertitudes à +/- 2 Is.....130
graphique n°3 28 Variation de l'écart type de x en fonction du diamètre de la bille.....132
graphique n°3 29 Variation de l'écart type de z en fonction du diamètre de la bille.....133
*graphique n°3 30 Variation de l'écart type du rayon en fonction du diamètre de la bille*133
graphique n°3 31 Variation de l'écart type de la sphéricité en fonction du diamètre de la bille.....134

graphique n°4 1 variation des x, y, z en fonction des matériaux.....137
graphique n°4 2 évolution des écarts type pour les 4 même matériaux.....137
graphique n°4 3 variation de l'écart de rectitude en fonction du nombre de points.....141
*graphique n°4 4 variation de la linéarité et l'écart type en fonction du nombre de points*142
graphique n°4 5 variations de la planéité et des écarts type en fonction du nombre de points.....145
graphique n°4 6 variation planéité sur 100 mesures sur 90mm x 90mm.....147
graphique n°4 7 variation des écarts type sur 100 mesures sur 90mm x 90mm.....147
graphique n°4 8variation des défauts de planéité en fonction du nombre de points......149
graphique n°4 9 variations dans le plan x, z :.....150
graphique n°4 10 Variations dans le plan x, z :.....151
graphique n°4 11 Circularité recalculée.....160
graphique n°4 12 variations des constantes du diamètre en fonction des valeurs nominales......161
graphique n°4 13 évolution des diamètres en fonction de la vitesse.....163
graphique n°4 14 Evolution du diamètre de 4 à 100 points.....165
graphique n°4 15 évolution de la circularité en fonction du nombre de points.....166
graphique n°4 16 Evolution du centre X, Y.....166
graphique n°4 17 Variation des coordonnées du centre de la sphère x, y, z en fonction du nombre de points......172

graphique n°4 18 Variation du diamètre de la sphère.....172
graphique n°4 19 Variation du défaut de sphéricité en fonction du nombre de points..173
graphique n°4 20 évolution du centre en x, y ,z en fonction de la vitesse. 176
graphique n°4 21 Evolution du diamètre en fonction de la vitesse. 176
graphique n°4 22 Evolution de la sphèricité en fonction de la vitesse......176
graphique n°4 23 Evolution des écarts type en fonction de la vitesse......177
graphique n°4 24 évolution de l'écart type en fonction de la vitesse 177
graphique n°4 25 variation du diamètres de la sphère en fonction de la vitesse et du nombre de points.....180

graphique n°D 1 linéarisation.....*268*
graphique n°D 2 différence entre linéarisation globale et linéarisation par partie.....*269*

Photos

photo n°1 1 La première machine tridimensionnelle de DEA 26
photo n°1 2 L*e premier capteur dynamique à déclenchement* [25]..... 28

photo n°3 1 approche du capteur avec un angle □□de 45 ° *95*
photo n°3 2 approche du capteur sur les sphères de mesures *96*

INTRODUCTION

Dans les productions industrielles, la réalisation de pièces mécaniques implique l'utilisation de moyens de plus en plus performants aussi bien dans la production que dans le contrôle.
L'utilisation des machines à mesurer s'est généralisée dans le contrôle dimensionnel.
Toutefois, la connaissance des incertitudes de mesures dans les opérations de contrôle et de métrologie reste un problème essentiel encore mal maîtrisé..

Les normes élaborées par les constructeurs de machines à mesurer définissent une incertitude de mesure par une expression :.

$$\pm \mathbf{A+ bL}$$

ou **A** est une incertitude représentative de la fidélité et **bL** une incertitude de position en fonction de la longueur mesurée.

Cette formule, très générale, ne donne qu'une indication sur l'incertitude de la machine, car la procédure utilisée ne préconise que la mesure de cales étalons dans une série de positions réparties dans le volume de mesure, sans tenir compte des conditions réelles de mesurage .

Une machine à mesurer par coordonnées (MMC) est globalement un dispositif permettant de déplacer une tête de mesure munie d'un capteur suivant trois axes de mesure pour l'acquisition de points.

Les paramètres pouvant modifier les résultats sont multiples.
On trouvera la longueur du palpeur, la vitesse de déplacement, le diamètre de la bille de palpage, le type d'élément mesuré, le nombre de points pris en compte, les algorithmes de calcul etc.

Nous proposons de donner une méthode d'obtention rapide de l'incertitude de mesure et de l'indice de capabilité suivant les critères employés par l'opérateur et de garantir la validité des produits mesurés.
Il sera pour cela nécessaire dans un premier temps de valider un modèle mathématique utilisant les analyses statistiques et dans un deuxième temps de valider les deux opérations principales de la mesure 3D qui sont la qualification du palpeur et la mesure d'éléments.

En réalité, le problème est plus complexe car les incertitudes de mesure dépendent des deux types d'erreurs qui sont :
La justesse de la machine et la fidélité.
Si la justesse est une somme d'erreurs de type systématique qui sont en partie corrigées dans les logiciels actuels, la fidélité des capteurs dépend d'un ensemble de paramètres variables suivant les choix effectués par l'opérateur.

Déroulement des travaux :

Les travaux qui vont suivre respecterons l'ordre qui va suivre.

Au chapitre I, un bref historique suivi de l'état actuel de l'art.

Dans le chapitre II, une étude expérimentale sur la détermination de la taille des échantillons servant aux différentes modélisations.

Le chapitre III couvre l'étude expérimentale de la qualification palpeur et la modélisation des résultats en fonction des paramètres utilisés .

Le chapitre IV traite de l'étude expérimentale des paramètres influant sur la mesure des éléments de base et la modélisation pour ces éléments de base : point, droite, plan, cercle et sphère.

Le chapitre V, une proposition d'un modèle de calcul des incertitudes et des capabilités des MMC, tenant compte des paramètres utilisés.
En fin de chapitre, nous conclurons sur les perspectives de modification des logiciels actuels afin de faciliter les calculs d'incertitude et de capabilité sur ce type de moyens de mesure.

Dans les annexes, en annexe I, la MMC utilisée et le logiciel employé.
En annexe II, quelques rappels de statistique.
En annexe III, les normes correspondantes.
En annexe IV, les programmes spécifiques et les résultats de mesure d'une pièce test utilisée dans les campagnes d'intercomparaison organisée par le Bureau national de métrologie .

CHAPITRE I

1-1-HISTORIQUE [30] ,[35]

Depuis toujours, l'homme a cherché à améliorer la qualité et la précision de ses étalons, donc de ses mesures.
Le maître mot est **incertitudes :** Incertitude sur la valeur, incertitude sur la définition, incertitude sur la conservation, incertitude sur l'utilisation d'un même étalon pour tout le monde en des lieux différents.

Tout au long de l'évolution de l'histoire, les hommes se sont attachés à une meilleure définition de ces étalons.

Les égyptiens, les hébreux dans l'antiquité conservaient précieusement leurs étalons dans les temples ou pour les romains dans le temple de Jupiter.
Pus tard, Charlemagne imposa une référence unique la **Toise**.

Mais il faut attendre le 26 mars 1791 pour une unité universelle **le Mètre.**

Dans notre ère industrielle, nous devons beaucoup au Professeur **Henri Tresca** des Arts et Métiers qui présenta le 28 septembre 1889 le premier mètre étalon qui fut déposé au pavillon de Breteuil ou il est toujours conservé.

Rappel :
La référence actuelle définie par la 17 ème Conférence Générale des Poids et Mesures en 1983, est: ..." la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant 1/ 299 792 458 ème de seconde ".
Cette nouvelle définition permet aux laboratoires primaires de donner la valeur du mètre avec une incertitude sur la valeur théorique inférieure au dixième de nanomètre.
Cette lente évolution montre le souci constant de minimiser les erreurs de mesure, on peut parler d'incertitudes par les métrologues .

Définitions fondamentales :

On définira la métrologie comme la science de la mesure [22]
On peut parler aussi de sciences des incertitudes
Et le résultat d'une mesure comme la somme d'une valeur réputée vraie et d'une incertitude. [12], [28].

1-2-BIBLIOGRAPHIE

Etat de l'Art

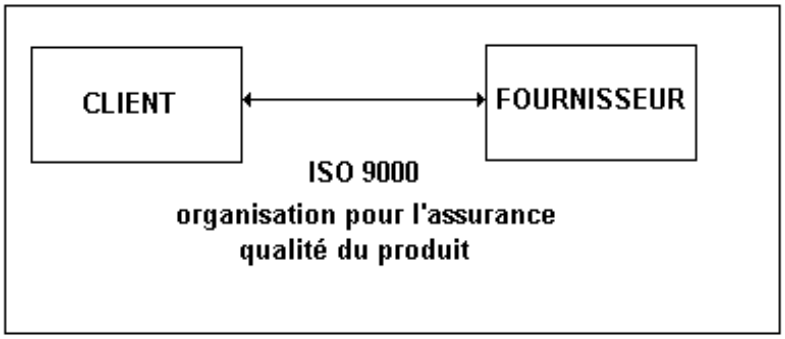
1-2-1 La métrologie et le contrôle. [10]

Combien d'opérateurs font-ils du contrôle sans faire de la métrologie ?
Le contrôle est nécessaire car il permet de vérifier si une cote, une dimension, sont dans l'intervalle de tolérances défini par un dessin de définition.
Mais pour contrôler, il faut mesurer et la mesure est quelquefois difficile car l'opérateur ne maîtrise pas forcément tous les paramètres qui influent sur un résultat de mesure. [31]
On admet assez facilement que l'on doit utiliser une machine de production adaptée aux besoins de précision et de performances d'un produit, mais admet-on aussi facilement qu'un appareil de mesure puisse ne pas être adapté aux besoins de précision que l'on recherche ?
Les normes internationales actuelles, baptisées **ISO 9000**, vont dans le sens d'une remise en cause quasi - systématique des certitudes et des '' suffisances ''de certaines entreprises qui ne se posent pas de questions sur la validité de leurs produits.
L'utilisation généralisée de l'affichage numérique et des "listing" de résultats confère une sorte de légitimité sur la validité du produit qu'un simple calcul d'erreur permettrait de mettre en doute.

1-2-2 Les normes ISO 9000

1-2-2-1-Rappels sur les normes ISO 9000. [26],[29]

Les ISO 9000 sont la base actuelle des rapports qui doivent être mis en place entre des clients et les fournisseurs potentiels lors de la passation des marchés



La certification d'entreprise se base sur les normes de la famille ISO 9000. Cette certification ne vise ni les produits, ni les personnes.
Elle atteste que le système qualité de l'entreprise est conforme à l'un des référentiels ISO 9001, ISO 9002, ISO 9003.
ISO vient du grec "ISOS" qui signifie identique et la certification conformément au référentiel
C'est aussi " l'International Système Organisation".
ISO 9000, est basée sur l'engagement de l'entreprise à appliquer ce référentiel en faisant contrôler cet engagement par des audits d'un organisme certificateur.
Les travaux de normalisation au sein de l'ISO se font dans le cadre de comités techniques ayant chacun un domaine de travaux défini. Celui chargé des normes ISO 9000 est le TC 176.
Les normes de la série ISO 9000 comprennent 5 normes principales :

ISO 9000-1 :
Normes pour le management de la qualité et l'assurance de la qualité – Partie 1 :
Lignes directrices pour leur sélection et l'utilisation. C'est la carte routière de la famille ISO. Elle explique les rôles de chacune des normes et examine les concepts fondamentaux de la série.

ISO 9001 :
Système qualité- Modèle pour l'assurance de la qualité en conception, production, installation et prestations associées.

ISO 9002 :
Système qualité- Modèle pour l'assurance de la qualité en production, installation et prestations associées.

ISO 9003 :
Système qualité- Modèle pour l'assurance de la qualité en contrôle et essais finaux.

Ces trois normes outre l'aspect global d'assurance qualité, contiennent un engagement de maîtrise des moyens de contrôle et d'essais.

Exigences en matière d'assurance qualité pour les équipements de mesurage :
Les points de passage pour la maîtrise des équipements de mesure pour les normes **ISO 9001 et ISO 9002** concernent le chapitre 4.11 et l'**ISO 10012-1** Partie 1 pour l'ISO 9003.
Un choix judicieux dans les besoins en Métrologie et la connaissance et la maintenance des moyens de mesure est donc une partie importante dans la mise en place des ISO 9000.

La suite de ces normes est plus axée sur l'aspect management.

ISO 9004-1 :
Management de la qualité et éléments de système qualité-
Partie 1 : lignes directrices. Cette norme décrit les éléments constitutifs d'un système de management de la qualité et donne les lignes directrices de la démarche à mettre en œuvre, éléments de coût à l'appui.

Système qualité- Modèle pour l'assurance de la qualité en production, installation et prestations associées .

1-2-1-1- Analyse des exigences d'assurance de la qualité des normes ISO 9000.

C Colas et P Reposeur **[27]** écrivent :
"Les normes ISO (ou normes européennes EN 29000 **)** exigent que, pour toute «mesure critique », le fournisseur puisse être à même de maîtriser, étalonner et maintenir en condition les équipements de contrôle, de mesure et d'essais (y compris les logiciels) que ceux ci leur appartiennent ou qu'ils leur aient été prêtés ou fournis par l'acheteur (client).
Ces instruments de mesure et d'essais doivent être utilisés de façon à s'assurer que **l'incertitude de mesure est connue et compatible avec l 'aptitude** (voir chapitre E) **requise en matière de mesurage. [10]**

Pour cela il lui faut :

- Maîtriser les équipements de mesure : (pas d'utilisation de matériels défectueux ou non raccordés, étiquetage et gestion de ces instruments)
- Etalonner et maintenir en condition : (raccordements aux étalons nationaux, comparaisons techniques, étalonnage ou vérification, qualification)
- Connaître l'incertitude de mesure : (évaluation du processus de mesure, bilan et chiffrage des causes d'erreurs, comparaison de la valeur numérique trouvée avec les spécifications requises pour le produit concerné)
- Analyser les besoins : (déterminer les mesurages, l'exactitude requise, et sélectionner l'équipement de contrôle) afin de bien identifier tous ces besoins par rapport à l'exigence de la qualité du produit. .

Il est d'ailleurs important de noter que d'ici 3 à 5 ans l'évaluation des incertitudes devra pouvoir être justifiée conformément au guide élaboré par l'ISO/TAG 4 (GUM)." **[12]**

Conclusions:
Je pense comme C.COLAS ET P.REPOSEUR que chaque fournisseur doit avoir un réflexe "Capabilité" de ses moyens de mesure. Mais s'il est relativement simple d'estimer une incertitude de mesure pour des moyens simples comme le pied à coulisse ou le micromètre, cela devient très difficile pour les chaînes de mesure complexes. Et les opérateurs ne peuvent pas toujours estimer avec rigueur la capabilité des moyens utilisés par manque d'informations ou par manque de temps.

1-2-1-2- L'importance des normes ISO 9000 dans les productions industrielles :

Dans le paragraphe précédent, nous avons montré les exigences des normes de la série ISO 9000 quant à la maîtrise des équipements de mesure et d'essai.
Il faut donc mettre ces instruments sous assurance qualité **[27]**, afin de pouvoir valider les produits fabriqués.
Mettre sous assurance qualité veut dire d'après la norme EN ISO 8402 :
« Mettre en place des actions préétablies et systématiques nécessaires pour donner la **confiance appropriée** en ce que la métrologie de l'entreprise satisfera aux exigences relatives à la qualité ».
Mais aussi «Mettre en œuvre des matériels donnés avec des méthodes spécifiques et **connaître les performances** de ces matériels dans des conditions de mesure particulières ».

En clair :

L’appareil de mesure utilisé est-il adapté à la tolérance que l’on veut vérifier ?

Les normes actuelles font référence à un terme nouveau comme la **Capabilité** qui permet de calculer l’adaptabilité du moyen utilisé, pour le contrôle ou les mesures, au besoin défini en termes d’intervalle de tolérance.

Mais la mesure engendre des connaissances scientifiques **[22]**, **[24]** en Métrologie que n’ont pas forcément tous les opérateurs qui sont appelés à utiliser des outils plus ou moins performants (du simple pied à coulisse à la chaîne complexe comme les machines à mesurer tridimensionnelles).

Une des premières règles est d’assurer le raccordement interne ou externe **[20-4]** des moyens de mesures aux étalons nationaux.
Ensuite il faut s’assurer de la conformité de ces moyens par des suivis au moyen de procédures**[20-5]** , de fiches de vie, d’identification et de vérification périodique.
Ce qui permet de déterminer la classe d'exactitude d'un appareil de mesure par rapport à une norme ou un règlement particulier.
Mais pour les chaînes complexes, ces valeurs ne sont pas forcément codifiées ou normalisées et on reste dans ces cas dans un flou qui est loin de la rigueur métrologique.

Connaît-on vraiment l’appareil utilisé ?

La grande difficulté pour les chaînes de mesure complexes est de connaître les incertitudes **[31]** de mesures pour les différentes conditions d’utilisation.
En effet un grand nombre de paramètres entrent en ligne de compte pour le calcul d’incertitude, et l’opérateur n’a pas forcément ni le temps ni les compétences pour se lancer dans des calculs qui peuvent s’avérer complexes.
Les fabricants de machines à mesurer donnent des incertitudes qui sont bien souvent estimées avec des conditions idéales de mesure (équipement, environnement, pièces de très bonne qualité géométrique etc.)
Mais il est difficile actuellement d’estimer correctement l’incertitude réelle de la machine utilisée suivant la configuration préconisée dans la procédure.

On doit donc dans ce cas se poser deux questions :

***Comment** aider l’opérateur à **choisir** ses conditions de mesures pour **contrôler** un produit ? (CCC)*
***Comment** aider un industriel à **choisir** en connaissance de cause le moyen de contrôle **adapté** à ses fabrications ? (CCA)*

Ces deux questions ont une implication très importante pour ne pas dire capitale dans les fabrications mécaniques.
Ces deux questions **CCC** et **CCA**, beaucoup de techniciens commencent à se les poser sérieusement.

Une première réponse est donnée par Jean Vincent **[13]**,**[20]** du CETIM Senlis.
"Le choix d’un moyen de mesure dépend de nombreuses considérations techniques et économiques liées à la grandeur à mesurer, aux conditions d’utilisation, aux systèmes de mesure ou de commande en place.

Il conseille de suivre une démarche en trois étapes dont les points clés sont :
1) La définition précise du cahier des charges
2) La sélection d'une technologie
3) Le choix d'un produit.
Il précise :
La définition précise du cahier des charges permet de définir un type de matériel et ses caractéristiques essentielles. En effet, le cahier des charges doit définir avec précision la nature et le type de la grandeur physique à mesurer, le type de capteur recherché et le type de signal électrique de sortie.
Cette définition doit aussi préciser :
Les caractéristiques métrologiques :
- L'étendue de mesurage
- L'exactitude de mesure requise
- La rapidité de la mesure en fonction du domaine d'évolution de la grandeur à mesurer .
- Les conditions d'utilisation :
- La gamme de température ambiante admissible
- Les surcharges admissibles pour les valeurs accidentelles
- La durée de vie
- Les spécifications géométriques

On rajoutera les spécifications économiques et les autres caractéristiques comme les conditions d'alimentation, la consommation, la masse du capteur ou de l'appareil etc."

Actuellement la sélection de la technologie est facilitée par les différentes informations données précédemment et les connaissances actuelles de la technologie.
Les méthodes de mesures sont généralement connues par les futurs utilisateurs, et de nombreux ouvrages **[1], [2], [3], [4], [5], [9], [11], [18], [19], [23],[25],[32], [37],[50],[55]** traitent déjà des possibilités des machines actuellement sur le marché.

Mais Jean Vincent ne souligne pas assez à mon avis que le point 3 reste la grande difficulté.
En effet comment choisir parmi toutes les solutions proposées et surtout toutes les offres des différents constructeurs ?
Les conditions idéales de mesure n'existant jamais, comment faire le tri entre les affirmations des uns et des autres (constructeurs, opérateurs, centres techniques etc.) et les non dits des constructeurs ?

On voit donc toute la difficulté de choisir un moyen adapté aux problèmes posés.
Il n'est d'ailleurs pas inutile de rappeler que la validité d'un produit se fera dans la plupart des cas à partir d'un résultat de mesure donné par l'instrument.

Conséquences:
Si la mesure obtenue est dans la tolérance, l'acceptation est immédiate. Si la mesure est largement hors tolérance, le refus est prononcé.
Mais comment réagir pour les cas litigieux ?
Une partie de la réponse est donnée par la norme NFE 02-204 **[24].**
Cette norme permet de prendre la décision d'accepter un produit avec un risque calculé (ou de le refuser), en fonction des deux paramètres tolérance de fabrication et incertitude de mesure.
La tolérance fait partie des spécifications imposées, mais comment évaluer au mieux l'incertitude de mesure ?

1-2-1-3- Etre certfié ISO 9000

Dans la plupart des entreprises touchant de près ou de loin à la mécanique, le leitmotiv est :
Etre accrédité ISO 9000 pour pérenniser et étendre les marchés.
Mais mettre en place ces normes ne se fait pas sans mal ni sans risques.
Combien de fausses pistes, de tâtonnements et d'erreurs dues à une mauvaise interprétation ou une incompréhension de ces normes ont conduit ces entreprises vers un rejet, quelquefois compréhensible, de ces nouveaux règlements.
Le discours qualité parle de gestion et d'assurance qualité, de management participatif, de qualité totale et réclame de tous une volonté d'améliorer la qualité.
Mais comment faire passer ce discours auprès de ceux qui fabriquent depuis longtemps et qui pensent accomplir leur tâche correctement et refusent de se remettre en cause ?
Certaines entreprises commencent par mettre en place un manuel qualité, voire sont mêmes prêtes à l'acquérir et le recopier chez leurs confrères ou concurrents.
C'est une erreur fondamentale car ces manuels ne reposeront sur la réalité.
Pour notre part, nous restons persuadés que la solution repose sur une bonne analyse du produit.
Tout fabricant doit se poser les 3 questions majeures pour garantir que ce produit sera toujours conforme au cahier des charges :

Comment ce produit est-il fabriqué ?
A partir de quelles spécifications ?
Comment est-il contrôlé ?

Une fois les réponses apportées à ces trois questions, on pourra aller plus loin dans la mise en place de l'assurance qualité voir même d'aller vers la qualité totale.

Actuellement, les entreprises ont résolu les problèmes liés aux deux premières questions.
Les outils de production sont de mieux en mieux maîtrisés, les spécifications, grâce à une meilleure normalisation, sont plus claires et mieux gérées. Mais pour la troisième, les réponses sont encore assez floues.
Le contrôle à posteriori coûte cher et il n'est pas toujours inclus dans les calculs de prix de revient.
Doit-il être systématique, par échantillonnage, arbitraire ?
Avec quels moyens, par quel personnel ?
Parler de qualité totale sans moyens d'évaluation de l'outil production et du produit fini reste dans le domaine de l'autosatisfaction .
La qualité dans les entreprises a été surtout vue sous l'angle de la gestion et du management.
C'est bien sûr nécessaire mais pas suffisant.
La qualité se mesure avec des indicateurs qui peuvent être subjectifs mais il ne faut pas oublier que le produit, lui, se mesure avec des instruments de mesure qui eux sont bien réels.
Ce qui n'est pas sans influence sur le coût final du produit.
L'investissement en moyens de contrôle va de quelques dizaines de francs à plusieurs millions pour des machines de haute précision. Choisir les moyens adaptés aux vérifications qui sont nécessaires pour pouvoir certifier la qualité du produit n'est pas toujours une tâche facile.
En dépassant le simple coût de l'investissement initial, on se rendra compte que la Métrologie est une source de gain de temps et forcément d'argent.
Il nous faut avant tout convaincre les dirigeants d'entreprises que la métrologie est un besoin et une nécessité et qu'il n'est pas de produit de qualité sans une métrologie adaptée.

1-2-1-4- Evolution du contrôle :

Le contrôle a beaucoup évolué.
Jusqu'au début des années 70, un marbre, des comparateurs, des vés et une bonne dose d'optimisme étaient suffisants. Et puis, dans les cas où on ne pouvait ou savait pas contrôler, on décrétait souvent "c'est bon ".

1-2-1-5- Histoire de la machine à mesurer : [25]

L'idée de contrôler des éléments dans les trois directions X, Y, Z était dans la plupart des métrologues.
Car la mesure sur un marbre ne permet des vérifications que suivant la direction Z.
Les retournements suivant chaque axe créent des erreurs importantes et la création de référentiel de mesure difficilement réalisable, pour ne pas dire impossible.
La première machine à mesurer manuelle a été conçue en 1962 (photo n°1-1) par la société **DEA** à Turin.

On voit sur cette photo que la première machine dérivait directement d'un marbre en fonte sur lequel étaient fixés 4 supports surmontés de deux rails.
Sur ces rails, une traverse et une colonne qui permet d'explorer toute la surface du marbre. Cette idée a été reprise pour les machines de type portique.

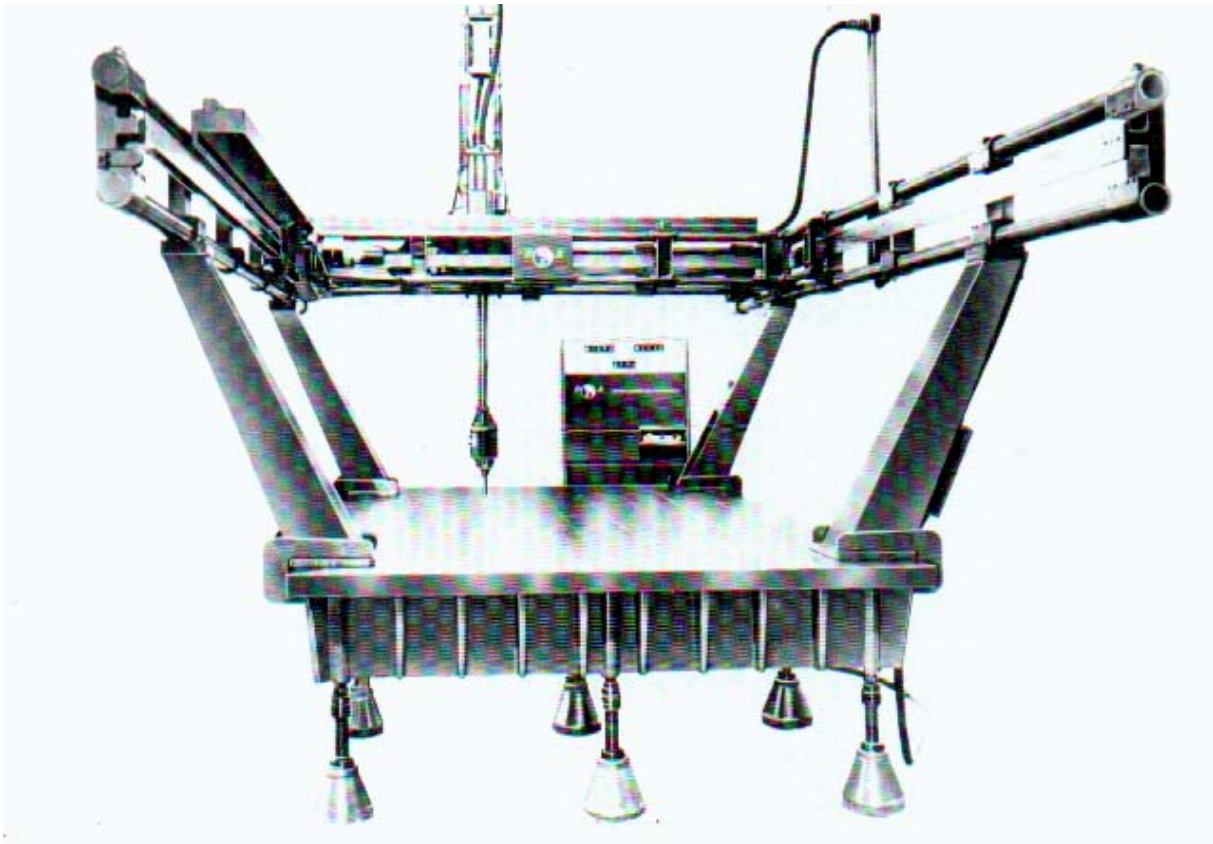


photo n°1 1 La première machine tridimensionnelle de DEA

1-2-1-6- Evolution :

En 1973, la première machine à commande numérique a été réalisée par **ZEISS**.
On trouve dans cette machine (UMM500) (figure n°1-1) les deux éléments fondamentaux que sont le calculateur et le palpeur universel.
La conception se rapproche plutôt des machines à pointer, la société **ZEISS** était à cette époque un des leaders mondiaux avec la société genevoise **SIP** pour la fabrication de ce type de machine de précision.

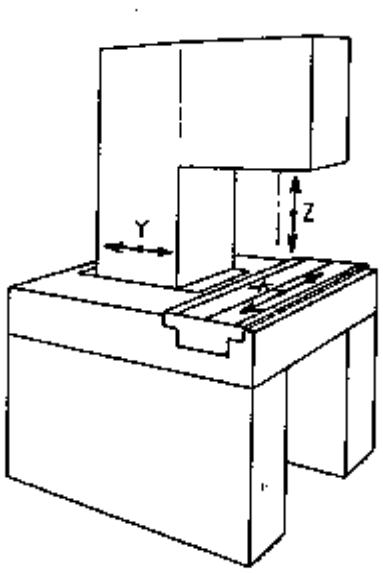


Figure 4

fig n°1 1 *La machine UMM500 de ZEISS*

Le développement des premiers algorithmes de calcul et leurs méthodes de traitement couplées à un calculateur ont permis de mesurer des surfaces usinées, sans que l'opérateur soit obligé d'effectuer lui-même les calculs.

Le premier palpeur à déclenchement a été réalisé en 1970 par **David Mac Murtry** (photo n°1-2) alors ingénieur chez Rolls Royce pour mesurer des tubulures extrêmement fines pour le moteur du Concorde**.[25**]



photo n°1 2 L*e premier capteur dynamique à déclenchement* [25]

En collaboration avec John Deer, il a fondé la société Rénishaw qui est actuellement un des leaders mondiaux des capteurs de machines à mesurer.
L'introduction des machines à mesurer, dérivées des machines à pointer, a beaucoup facilité la mesure (gain de temps, informatisation des procédures, archivages des résultats).
Mais la course aux logiciels et aux capteurs de mesure de plus en plus sophistiqués a en partie occulté les problèmes majeurs de ces nouveaux moyens et certaines questions restent en suspens.

Quelles sont les erreurs propres de ces machines ?
La machine utilisée est-elle adaptée au contrôle que l'on veut faire ?
Le personnel est il capable de bien utiliser et interpréter les résultats de ce type de machine ?

Monsieur A.HUET **[52],** de la société Brown et Sharpe, lors du congrès international de métrologie en octobre 1999, a présenté une conférence sur l'importance des machines à mesurer sur le processus industriel, et donne en conclusion les trois notions qui doivent êtres prises en compte lors de l'achat d'un tel type de matériel :

- Définition du besoin technique
- Position du contrôle dans le processus industriel
- Dimension humaine de l'entreprise

On retrouve dans cet article un certain nombre de réponses aux questions précédentes, sur le choix d'une machine, sur son entretien, sur son environnement, sur l'intégration dans le process. Mais il soulève aussi la dimension humaine qui est la clé de la réussite d'un investissement. L'utilisation de la machine en **"presse bouton"** nécessite **un père technique** capable de piloter le langage évolué et la machine elle même.

1-2-1-7- Conclusions

L'utilisation des machines à mesurer dans la production est devenue indispensable.
Mais leur emploi demande beaucoup de discernement et de connaissances avant de traduire les résultats de mesure d'une pièce donnés par un listing en terme de validité ou de rebus .

1-2-3- Les travaux déjà effectués

De nombreux travaux ont été réalisés sur l'amélioration de la qualité des mesures sur ce type de machine.
En 1976, **P.BOURDET et A.CLEMENT [73],** définissaient le torseur des petits déplacements pour optimiser l'association d'une surface à un nuage de points.

En 1984, **A.CLEMENT, P.BOURDET et R.WEILL [64]** comparaient différentes méthodes d'optimisation de surfaces. Ils soulevaient un des problèmes fondamentaux de la mesure tridimensionnelle.

En 1987, **P BOURDET[2]** définit un modèle d'identification géométrique des surfaces. Ce modèle mathématique a permit la mesure sur MMT par une optimisation des moindres carrés.

R.CASTELJAU [65] a émis des idées de base comme
"de la tradition de se référer à l'extremum d'une fonction pour exprimer la qualité d'un résultat, résultent autant de solutions qualifiées de meilleures solutions qu'on a de façons de pratiquer cette estimation", .et
"La matrice des coefficients qui permet de résoudre le système linéaire de Cramer (dans le cas d'un lissage des moindres carrés) est désespérément proche de zéro...En pratique, une infime variation des entrées bouscule tout, même l'ordre de grandeur et le signe des variables de sortie...la question mériterait d'être confirmée par un calcul d'erreur..."
.
Les travaux de **M FALL** et **A CLEMENT** se sont étendus en 1987 à l'étude de l'évaluation numérique de tout logiciel de calcul**.[66]**
Ils ont aboutis à à SCRIPT (Software Control Relyng on inverse problem theory **[67]**

En 1988, **S SARTORI, PC CRESPO, DI CIOMMO et T K KANCHEVA [70**]on donné une meilleure approche de la précision des machines à mesurer.

L. MATIEU, C.LARTIGUE, P.BOURDET, [68] au congrès international de métrologie de Lille en octobre 1993, ont montré que dans le contrôle des spécifications par zone de tolérance (ISO 1101), les solutions proposées par les logiciels de machine à mesurer étaient source de non qualité.
Après une présentation de l'élément tolérancé **[6]**, de la référence spécifiée et de la zone de tolérance qui définit le ou les espaces dans lesquels doivent se trouver le ou les éléments tolérancés, les auteurs définissent la zone de tolérance comme une zone simple ou une zone composée.
La figure n°1-2 montre les zones de tolérances simples.

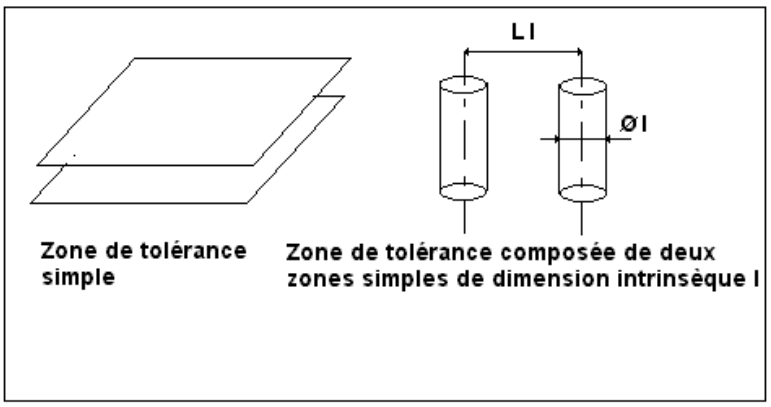


fig n°1 2 *Zones de tolérances simples*

Dans le cas d'une zone composée de zones simples, l'orientation et la position relative de zones simples sont contraintes par des dimensions de référence linéaires ou/et angulaires.
Ces dimensions s'expriment entre des éléments de situation des zones simples.
La dimension d'une zone simple est caractérisée par un paramètre de type longueur.
Pour une zone composée, les valeurs du paramètre de chaque zone simple peuvent être toutes identiques ou différentes.
La valeur du paramètre d'une zone simple peut être une fonction de la dimension intrinsèque de l'élément tolérancé.
Selon la nature de défaut de l'élément réel (forme, orientation, position) dont on cherche à limiter l'amplitude, la zone de tolérance est ou n'est pas contrainte en orientation ou en position par rapport à une référence tolérancée.
Dans le cas d'une spécification portant sur la forme de l'élément, la zone de tolérance n'est pas contrainte par une référence spécifiée.
Ces dimensions s'expriment entre les éléments idéaux de la référence spécifiée et les éléments de situation de la zone.
S'il s'agit d'une zone simple, la dimension s'applique à l'élément de situation de la zone simple.
S'il s'agit d'une zone composée, les dimensions s'appliquent aux élément de situation de la zone composée d'éléments simples.
La figure n°1-3 montre les zones composées d'éléments simples.

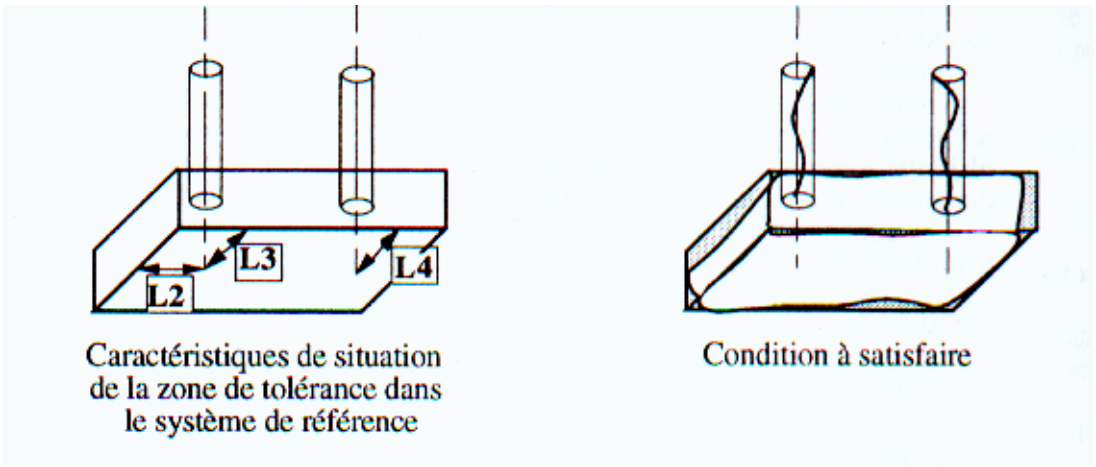


fig n°1 3 zone composée d'éléments simples

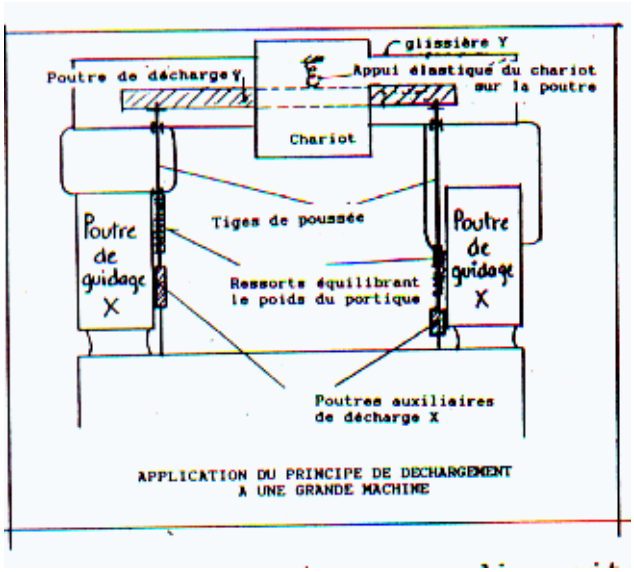
Les ambiguïtés constatées dans les spécifications normalisées sources de non-qualité reposent :
- *Sur les critères d'association des éléments géométriques idéaux aux surfaces ou aux lignes réelles qui sont mal définies*
- *Sur la définition des axes réels et des surfaces médianes réelles qui n'est pas donnée.*

Les fonctionnalités communes des logiciels de MMT sont donc définies par :
- *Une assistance à l'acquisition des points mesurés sur une pièce*
- *Le traitement mathématique des mesures*
- *Les traitements statistiques des résultats de mesure sur un ensemble de pièces.*

En conclusion, les auteurs soulignent l'importance pour les contrôleurs de se poser des questions et les poussent à entreprendre des actions pour amener l'ensemble des acteurs à une uniformisation de la cotation dans l'entreprise.
Dans l'étude qui va suivre, nous nous sommes attachés à mesurer des éléments considérés comme "parfaits" de manière à enlever les ambiguïtés précédentes.

Toujours lors du même congrès, J.M DAVID et T. COOREVITS **[69]** ont définit une architecture nouvelle pour minimiser les incertitudes de la correction par logiciels des corrections des erreurs de géométrie des MMT.

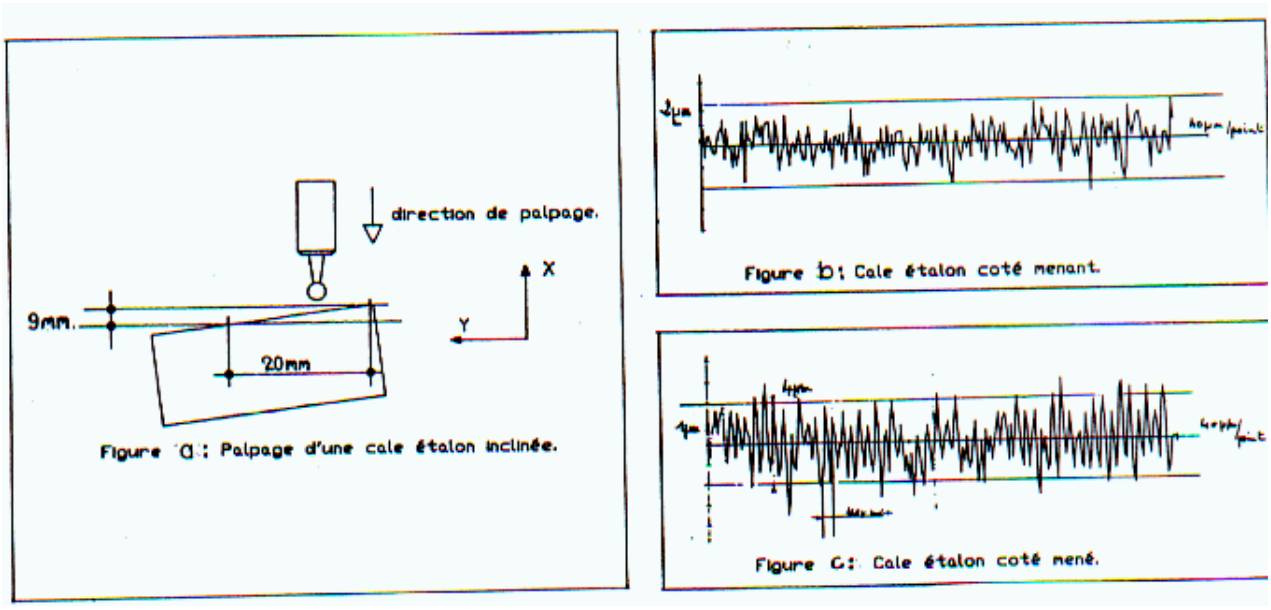
fig n°1 4 architecture d'une nouvelle MMT



Globalement, le système envisagé dans le cas de grande machine et afin de ne pas charger les glissières X par le poids d'un portique, est constitué de deux glissières solidaires d'un bloc en béton. (figure n°1-4) .Dans le cas d'une machine de type portique classique, la répétabilité coté menant et coté mené n'est pas la même. Les auteurs montrent notamment que ces valeurs peuvent être doublées.

Le test effectuée sur une cale étalon montre que la dispersion locale passe de 2 à 4 µm suivant que l'on se situe de part et d'autre du portique. La figure n°1-5 montre l'influence sur la répétabilité de la position du portique par rapport à l'axe moteur.

fig n°1 5 ***l'influence sur la répétabilité de la position du portique par rapport à l'axe moteur.***



En conclusion, les auteurs pensent que les déplacements de charge et les effets thermiques seraient minimisés et que le surcoût pour les constructeurs seraient amortissable car celui-ci compense, dans le cas de machine de grande dimension, l'amortissement de la réalisation d'enceinte climatique. Ils font apparaître un terme nouveau baptisé microjustesse qui est le phénomène répétable parmi le brouillard environnant les résultats de mesure de la cale.

Il est à noter que la société Game Ingéniérie avait présenté lors des premières journées d'Aquitaine en 1983, à l'origine des congrès de métrologie actuels, une machine de grande dimension basée sur un système analogue. Les déplacements étaient pilotés par des interféromètres à comptage de franges. (voir figure n°1-6 ci-dessous)

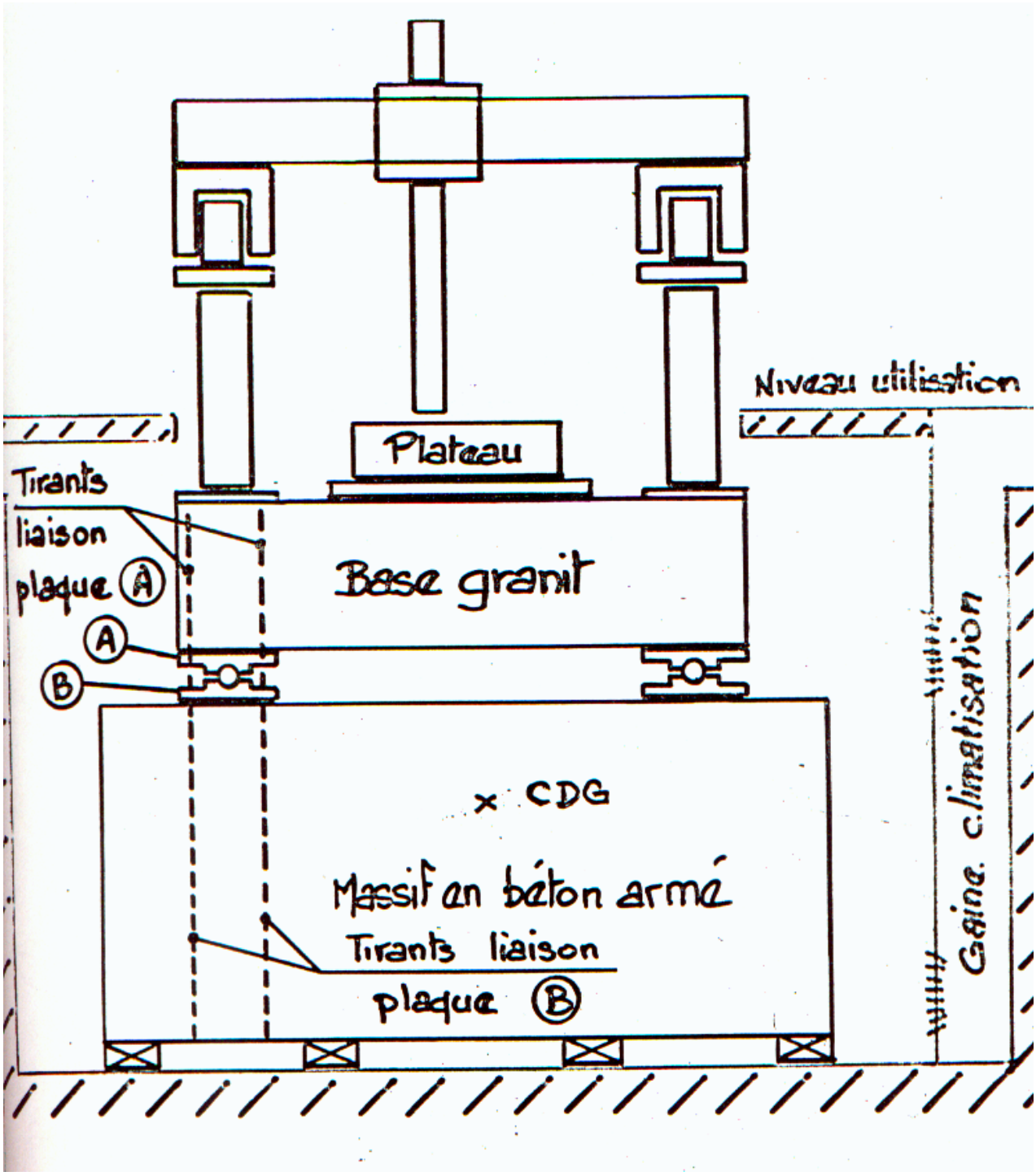


fig n°1 6 MMT de la société Game Ingéniérie

Patrice CHOLLET [21] dans sa conclusion, définit la réduction des erreurs d'une machine à mesurer comme un passage obligé vers une démarche qualité (ISO 9000).
Les points principaux qu'il souligne sont :

- Une formation adéquate des opérateurs,
- Une norme de référence pour les algorithmes d'identification de surfaces et pour les méthodes .
- Une modélisation fine de la machine qui tient compte de son environnement en vue d'une compensation informatique des erreurs **[8].**

Pour atteindre l'objectif de quantification des erreurs il propose la démarche suivante :

- Modélisation des erreurs,
- Analyse des méthodes de réduction des erreurs
- Relations entre ces méthodes,
- Limite de ces méthodes,
- Calcul des limites .

Tout cela permet de connaître globalement les erreurs d'une machine tridimensionnelle et de compenser par logiciel le champ de déplacement au ''point fonctionnel '' intégrant le changement de palpeur''

Principe appliqués aux solides indéformables :

L'hypothèse admise est que le plus souvent une MMT est composée de trois glissières orthogonales montées en série, de 3 capteurs de position placés parallèlement aux glissières et d'un capteur.

Vecteur d'erreur pour une glissière :

On défini à chaque glissières deux solides, une base et un coulisseau.(fig n°1-7)
Les six erreurs définies sont :

- 1 une erreur de positionnement
- 2 erreurs de rectitude
- 3 erreurs de rotation ,

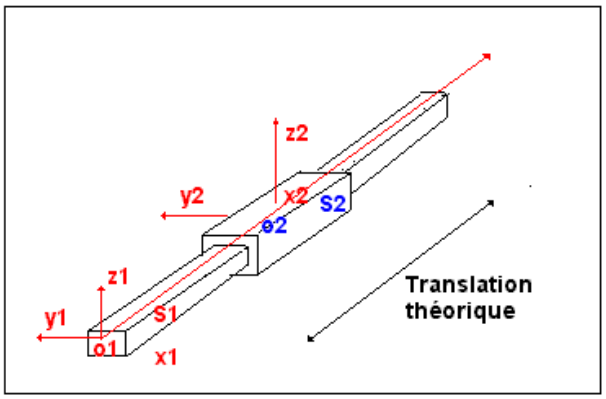


fig n°1 7 barre et coulisseau

Ce qui donne bien pour les 3 glissières 18 erreurs.[**21], [60]**
Il faut rajouter les 3 erreurs de perpendicularité dans les trois plans XY, XZ, YZ
Nous avons donc, comme le souligne P.CHOLLET définit 21 erreurs qui permettent de modéliser les erreurs géométriques d'une machine tridimensionnelle.

Définition du vecteur de l'erreur non corrigée:

Les erreurs aléatoires et d'hystérésis forment un parallélépipède d'arêtes parallèles aux axes de déplacement :

La figure n°1-8 ci dessous montre la représentation de ce vecteur .

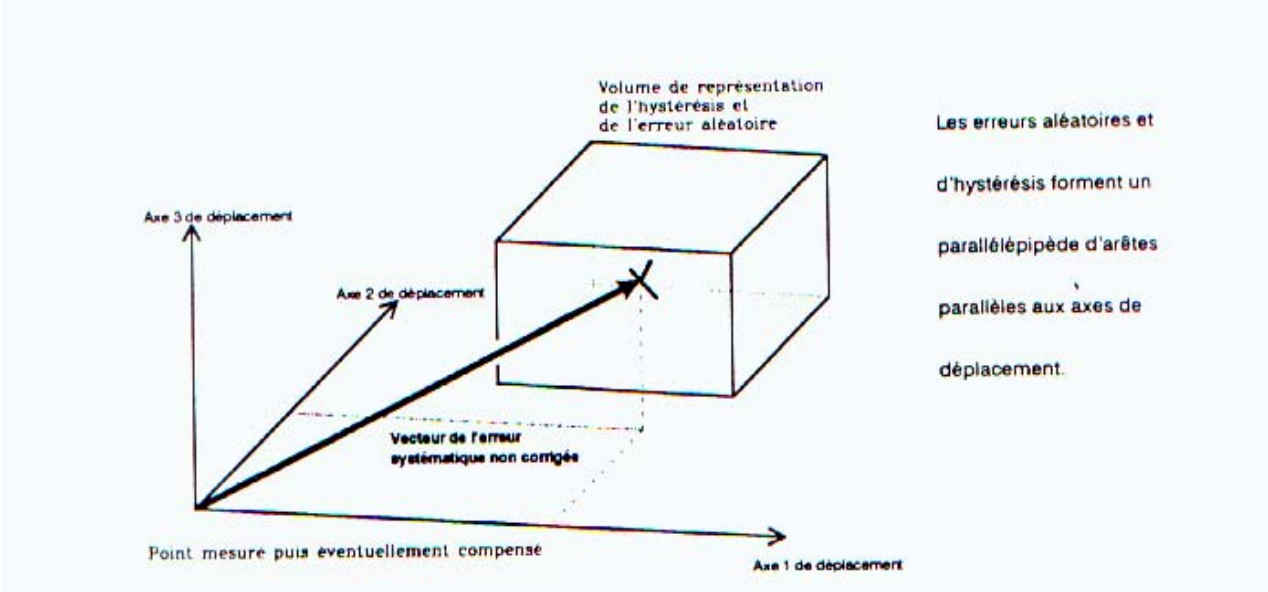


fig n°1 8 Vecteur de l'erreur non corrigée

D'autres erreurs interviennent d'une manière beaucoup plus difficile à cerner comme
les déformations dues aux transfert de charge (portique en appui sur le marbre) ou l'hétérogénéité des matériaux composant la machine.
Tous ces défauts sont intégrés expérimentalement dans le modèle de la composition des 21 erreurs.
On trouvera enfin les erreurs liées a l'équipage palpeur que nous allons voir plus loin..

Dans l'étude qu'il présente**[21]**, **P.CHOLLET** fait apparaître l'influence de certains paramètres comme celle d'un palpeur désaxé de 14 mm et de longueur 50 mm.
Les valeurs qu'il donne montre qu'elles peuvent atteindre 8.2 µm sur 500 mm suivant l'axe principal X et 3.5 µm avec un accostage suivant l'axe Y.
Nous verrons par la suite qu'une partie de ces incertitudes se retrouvent dans la qualification des palpeurs.
Pour une distance nulle , l'incertitude minimale peut atteindre 2.25µm. Après compensation en temps réel, les incertitudes tombent à 1 µm dans le centre de la machine et 1.5 µm à la limite du volume de la machine.

Conclusions:
On voit bien dans ce cas l'amélioration certaine apportée par la compensation des MMT par logiciels.
Il souligne aussi la difficulté d'atteindre une incertitude globale égale au micromètre dans une machine de 1000 x 1000 x 1000 mm .
Et, de plus, il ne parle que de l'incertitude du point fonctionnel.

Ces travaux ont été repris en 1993 par **M PRIEL [71]**, du Laboratoire National d'Essais, en une réflexion sur l'estimation des incertitudes de mesures de longueur sur les machines par coordonnées. En effet, les normes de réception des MMC préconisent la mesure d'étalons disposées dans le volume de la machine.
Le tableau suivant n°1-1 donné par la norme Française NFE 11-150 précise les éléments à mesurer et le nombre d'étalons dans les différentes positions.

Tableau n°1 1 *NFE 11-150*

		nombre d'axes de mesures			
		1	2	3 (linéaires)	3 (linéaires) + 1 (rotation)
Nombre Recommandé (1)	de cales	10	8	8	8
	de positions de contrôle	1 (2)	3	12	12 +2 (3)
Nombre Recommandé	de bagues	1	1	1	1
	de tampons	1	1	1	1
	de cônes	-	1	1	1
	de sphères	-	-	1	1
	de positions de contrôle	1	2	3	3

(1) les nombres de cales et de positions peuvent varier à condition que le produit de deux reste voisin de celui du tableau. En outre, si la plus grande cale ne couvre pas 75 % de l'étendue de mesure du plus grand axe, le nombre de positions doit être augmenté.
(2) Des mesures complémentaires doivent être faites pour estimer la répétabilité (par exemple 5 mesures dans la même position).
(3) Dans le cas ou l'axe de rotation est un axe mesurant, les contrôles doivent être effectués dans les deux positions complémentaires, en faisant varier la position angulaire du plateau au cours des mesurages d'une même cale; exemple face1 à θ 1 et face 2 à θ2 .

Mais cela ne permet que donner une estimation globale sur la validité de la machine concernée.

Dans ces travaux M PRIEL traite un exemple complet suivant une direction X.
Il complète ses analyses par un réflexion sur l'estimation des incertitudes des mesures de longueur à l'aide d'une MMT **[71]**

Suivant l'axe X cela permet d'estimer la variance (ou l'incertitude type) intégrant les corrections de rectitude de l'axe considéré (rotation et orthogonalité) de position (justesse) tout en excluant les effets thermiques.
Il attire l'attention des utilisateurs sur les risques à négliger les termes de corrélation dans une mesure globale.
La formule de composition des erreurs en X donne:

$$u_c{}^2(X) = u^2(x_i) + u^2(xTx_i) + u^2(yTx_i) + u^2(zTx_i) + (z_i + z_t).u^2(xRy_i) + y_t..u^2(xRz_i) + (z_i + z_t).u^2(yRy_i)$$

$$+ y_t..u^2(xRz_i) + z_t..u^2(zRy_i) + y_t..u^2(zRz_z) + y_t..u^2(sSy + z_t..u^2(ySz) + u^2(Vx) + termes.\text{cov}\, ariances)$$

En posant: variances justesses

$xTx_i = u^2(J)$

.Variances rectitudes

$u^2(T)$

Variances sur les rotations

$u^2(R)$

Variances sur les orthogonalités

$u^2(S)$

Et après diverses simplifications, M PRIEL arrive une formule donnant l'incertitude type exprimée au niveau d'un écart type :

$$u_c(x) = \sqrt{u^2(x_i) + u^2(J) + 2u^2(T) + 2z_i.u^2(R) + y_i.u^2(S) + z_i.u^2(S) + u^2(Vx)}$$

Tout en soulignant la sous évaluation de l'incertitude réelle car le modèle ne corrige pas toutes les erreurs systématiques présumées, il montre clairement comment se propagent les incertitudes sur les facteurs correctifs.

Le terme en $u^2(xi)$ représente la fidélité de la machine, les termes Vx, Vy, Vz désignent les erreurs de palpage dans les 3 directions x,y,z..

Il préconise de travailler indépendamment sur chaque axe afin de rendre ces covariances négligeables..

Récapitulatif :

Erreur de justesse xTxi
Erreur de rectitude yTxi (dans le plan XY)
Erreur de rectitude yTxi (dans le plan ZX)
Erreur de rotation xRxi (autour de X)
Erreur de rotation xRyi (autour de Y)
Erreur de rectitude xRzi (autour de Z)

Idem pour les autres axes Y et Z

Le tableau n° 1-2 montre les erreurs décomposées

Tableau n°1 2 erreurs décomposées

	Axe X (µm)	Axe Y (µm)	Axe Z (µm)
Erreur de justesse	0.17	0.11	0.03
Erreur de rectitude x	-	0.22	-0.01
Erreur de rectitude y	-0.02	-	-0.05
Erreur de rectitude z	0.31	-0.07	-
Erreur de rotation x	2.8 x 10-7	-2.4 x 10-7	1.6 x 10-7
Erreur de rotation y	4.0 x 10-7	2.2 x 10-7	5.9 x 10-7
Erreur de rotation z	-7.8 x 10-7	-3.4 x 10-7	3.9 x 10-7
Erreur de palpage	0.1	0.1	0.1

De plus le tableau de résultats donnés en annexe permettent de définir sur une machine les erreurs au point de coordonnées X=500 mm, Y=400 mm, Z =300 mm .
Le tableau n° 1-3. donne des valeurs sur les coordonnées 500 x 400 x 300

Coordonnées du point	Erreurs en µm
P xi	0.22 µm
P yi	0.13 µm
P zi	0.54 µm

Tableau n°1 3 Résultats pour X=500 mm, Y=400 mm, Z =300 mm .

Ou en calculant le module du vecteur d'erreur résultant :

P (xi,yi,,zi) = 0.6 µm
La suite de ses travaux donne un ensemble de résultats sur des cales de longueur différentes de 20 mm à 600 mm, ce qui permet de mieux cerner les incertitudes sur la mesure d'artefacts de type cales étalons.

Conclusions :

Les valeurs obtenues par le LNE et M PRIEL donnent une connaissance de l'incertitude intéressante sur la mesure d'un point.
Mais une machine 3D ne mesure que rarement des points seuls. Ces points font partie d'éléments de base comme la droite, le plan , le cercle etc.
Bien que la recommandation WECC CMM EXPERT GROUP-version 2.14 donne des conditions générales sur les limites d'utilisation de ces machines, les résultats ne précisent pas assez les conditions de mesure réelles.
Il me semble aussi que l'évaluation des valeurs de V(x), V(y), V(z) demande une analyse plus complète car ces valeurs dépendent d'autres paramètres qui peuvent varier de manière non négligeable.

M PRIEL **[28]**, dans un autre article, reprend et précise les méthodes de calcul des incertitudes définies par le GUM93 **[12].**

Méthode de calcul des incertitudes [28] ,[75] .

1-Introduction

Globalement, le résultat d'une mesure est :

Résultat d'une mesure = valeur vraie + erreur

Le vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie **(VIM)** définit deux types d'erreurs :
Erreur aléatoire : Elle est liée aux conditions de répétabilité de la mesure.
Erreur systématique : C'est l'écart entre la moyenne infinie de résultats de mesure par rapport à la valeur supposée du mesurande.

Résultat d'une mesure = valeur vraie +erreur aléatoire + erreur systématique

Diminution des erreurs :
On diminue les erreurs aléatoires en **répétant** les mesures et les erreurs systématiques en appliquant des **corrections.**

Les erreurs statistiques(dites aléatoires) :
On admet qu'une série de mesures constitue un échantillon extrait d'une population mère.
A condition que cet échantillon soit représentatif (effectuer des tests de normalité), on pourra calculer les estimateurs de la moyenne et de la variance de cette population.

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum x_i \text{ et} \qquad U^2(x) = \frac{1}{n-1}\sum (x_i - \bar{x})^2$$

L'incertitude type est donnée par $u(x) = \sqrt{U^2(x)}$
l'incertitude composée est $uc(y)$. Avec un facteur d'élargissement k on détermine l'incertitude élargie qui devient

$$U = k\ u_c(y)$$

On prendra généralement k= 2 pour assimiler les résultats à un niveau de confiance de 95 %.

Type des erreurs :
Les erreurs dites systématiques :
Certaines de ces erreurs pourront être définies d'une manière quasi certaine, et dans ce cas feront l' objet de corrections.
Elles peuvent être de deux types :
Corrections d'étalonnage**(Ce) :** liées directement au certificat d'étalonnage
Corrections d'environnement**(Ca)** : liées à la température, à la pression atmosphérique ou à l'hygrométrie.

Ce qui nous donne si Y est le résultat du processus de mesure

$$Y = \bar{x} + Ce + Ca$$

Incertitudes de mesures :
Les corrections systématiques seront appliquées à la mesure, mais il reste un doute quant à ces valeurs.

En effet, une correction de température de 19 à 20° peut être faite, car on considère qu'une température environnante moyenne est bien de 19°, mais qu'elle est la variation autour de 19° de ce laboratoire ?

Estimation des différentes composantes :

Les 3 composantes seront classées soit en erreurs de type A pour la première et en type B pour les deux autres.
Loi de propagation des incertitudes :

$$u_c{}^2(y) = \sum_{j=1}^{n}\left[\frac{\delta_i}{\delta x_i}\right]^2 u^2(X_i) + 2\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\frac{\delta f}{\delta X_i}\frac{\delta f}{\delta x_j}u(x_i, x_j)$$

Xi et Yi ont pour estimateurs xi et xj et u (xi, xj) est la covariance estimée de Xi, Xj et uc²(y) est la variance de l'incertitude combinée de y
La formule précédente peut s'écrire :

$$U_c{}^2(y) = \sum_{j=1}^{n}\left[\frac{\delta f}{\delta X_i}\right]^2 u^2(xi) + 2\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\left[\frac{\delta f}{\delta X_i}\frac{\delta f}{\delta X_j}\right]u(X_i)u(X_j)r(X_i, X_j)$$

Et dans le cas ou toutes les covariances sont nulles, c'est à dire que les phénomènes sont indépendants entre eux, la loi de composition des incertitudes devient beaucoup plus simple à écrire car le deuxième terme devient nul.
(r =estimateur du coefficient de corrélation entre les deux paramètres influant sur la mesure)

$$r(x_i, x_{j)} = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i).u(x_j)} = 0$$

Et dans l'équation

$$Y = \bar{x} + C_e + C_a$$

la loi de propagation des incertitudes devient :

$$uc^2(y) = u^2(\bar{x}) + u^2(C_e) + u^2(C_a)$$

et en le mettant sous forme d'écart type :

$$uc(y) = \sqrt{u^2(\bar{x}) + u^2(C_e) + u^2(C_a)}$$

La norme issue d'une recommandation du BIPM (bureau international des poids et mesures), définit en fait deux types d'incertitudes :
Les incertitudes de types A et les incertitudes de type B

Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure

1)Extrait de la norme NFX07-020 (juin 96)

Le terme «incertitude» signifie doute.
Ainsi incertitude de mesure signifie doute pour la validité d'un résultat de mesure.

Incertitude de mesure :
Paramètre associé au résultat de mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient être raisonnablement attribuées au mesurande.
(voir aussi le vocabulaire du VIM, première édition 1984,3.09)

Incertitude type :
Incertitude du résultat d'un mesurage exprimée sous la forme d'un écart type.

Evaluation de type A :
Méthode d'évaluation de l'incertitude par l'analyse statistique de séries d'observations.

Evaluation de type B :
Méthode d'évaluation de l'incertitude par des moyens autres que l'analyse statistique de Séries d'observations.

Incertitude type composé (Is) :
Incertitude type du résultat d'un mesurage, lorsque ce résultat est obtenu à partir des valeurs d'autres grandeurs, égale à la racine carrée d'une somme de thermes, ces termes étant des variances ou des covariances de ces grandeurs, pondérées selon la variation du résultat de mesure en fonction de celle de ces grandeurs.

Incertitude élargie (Ig):
Grandeur définissant un intervalle, autour du résultat d'un mesurage, dont on puisse s'attendre à ce qu'il comprenne une fraction élevée de la distribution des valeurs qui pourraient être attribuées raisonnablement au mesurande.
Dans le vocabulaire INC-1(1980) cette incertitude élargie est aussi appelée **incertitude globale.**

Facteur d'élargissement :
Facteur numérique utilisé comme multiplicateur de l'incertitude type. (Entre 2 et 3).

2)Méthode de calcul :

Estimation du mesurande :

$$y = f(x_1, x_2, ...x_N)$$

$$y = \overline{Y} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} f(x_1, x_2, ..x_N.k)$$

ou dans la plupart des cas

$$\overline{q} = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n} q_k$$

Evaluation de type A de l'incertitude type :

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1}\sum_{k=1}^{n}(q_k - \overline{q})^2.$$

Evaluation de type B de l'incertitude type :
Pour une estimation xi d'une grandeur d'entrée Xi qui n'a pas été obtenue à partir d'observations répétées, la variance estimée associée $u^2(xi)$ ou l'incertitude type u(xi) est évaluée par un jugement scientifique fondé sur toutes les informations disponibles au sujet de la variabilité possible de Xi.
Elles peuvent comprendre :

- des résultats de mesures antérieurs
- l'expérience ou la connaissance de comportement
- les spécifications constructeur
- les données fournies par des certificats d'étalonnage
- l'incertitude assignée par des ouvrages de référence.

Résumé: (hors norme NFX 07-020)
La recommandation INC-1 permet de combiner les différentes composantes de l'incertitude.

2.1) L'incertitude d'un résultat de mesure comprend généralement plusieurs composantes qui peuvent être groupées en deux catégories d'après la méthode utilisée pour estimer leur valeur numérique :

A. celles qui sont évaluées en appliquant des méthodes statistiques à une série de déterminations répétées,

B. celles qui sont évaluées par d'autres moyens.

Il n'y a pas toujours une correspondance simple entre le classement dans les catégories A ou B et le caractère "aléatoire" ou "systématique" utilisé antérieurement pour classer les incertitudes. L'expression "incertitude systématique" est susceptible de conduire à des erreurs d'interprétation ; elle doit être évitée.

Toute description détaillée de l'incertitude devrait comprendre une liste complète de ses composantes et indiquer pour chacune la méthode utilisée pour lui attribuer une valeur numérique.

2.2) Les composantes de la **catégorie A** sont caractérisées par les variances estimées $\mathbf{s_i^2}$ (ou les écarts types estimés $\mathbf{s_i}$ et les nombres $\mathbf{v_i}$ de degrés de liberté.
Le cas échéant, les covariances doivent être données.

2.3) Les composantes de la **catégorie B** devraient être caractérisées par des termes $\mathbf{uj^2}$ qui peuvent être considérés comme des approximations des variances correspondances dont on admet l'existence. Les termes $\mathbf{uj^2}$ peuvent être traités comme des variances et les termes **uj** comme des écarts type.

2-4) L'incertitude composée devrait être caractérisée par la valeur obtenue en appliquant la méthode usuelle de combinaison des variances. L'incertitude composée ainsi que ses composantes devraient être exprimées sous la forme "d'écarts type".

2.5) Si pour des utilisations particulières, on est amené à multiplier par un facteur l'incertitude composée afin d'obtenir une incertitude globale la valeur numérique de ce Facteur doit toujours être donnée.

3) Procédure proposée pour l'établissement des formules d'incertitudes dans les opérations d'étalonnage

- Etablir un bilan aussi complet que possible des causes d'incertitudes affectant la méthode d'étalonnage
- Appliquer les corrections des incertitudes à caractère systématique
- Ne pas prendre en compte les causes d'incertitudes liées aux caractéristiques de l'instrument à étalonner. En effet, il s'agit de caractériser une procédure indépendante de cet instrument.

Le laboratoire d'étalonnage devra indiquer ces incertitudes lorsqu'il réalisera l'étalonnage de l'instrument et délivrera un document d'étalonnage

- Evaluer la contribution de chaque composante de l'incertitude :
.les composantes de **type A** seront estimées en appliquant des méthodes statistiques,
. les composantes de **type B** seront appréciées en se fondant sur l'expérience. Il est de pratique courante d'apprécier l'incertitude maximale des composantes, dans ce cas **uj**
peut être donné par la règle pratique suivante :

$$Uj = \frac{incertitude * Maxi * de * la * composante}{3}$$

- Calculer l'estimation de l'écart type composé :

dans le cas où les composantes pourraient être considérées comme indépendantes, l'écart type composé s'obtient en réalisant une somme quadratique :

$$s = \sqrt{\sum s_i{}^2 + \sum u_j{}^2}$$

NOTA : Dans le cas où un terme fonction du carré de la grandeur mesurée apparaîtrait sous le radical, cela conduit à des expressions compliquées, et afin de simplifier les formules, on pourra employer la règle empirique et approximative suivante :

$\sqrt{A^2 + B^2 L^2}$ ===> **a + bL , L** étant la grandeur mesurée

4) Calcul de l'incertitude globale

Le résultat final d'un mesurage s'exprime, d'une part, par l'estimateur **μ** de la valeur vraie et, d'autre part, par l'estimation de l'incertitude globale. Dans la pratique, il est habituel d 'indiquer l'incertitude sous forme d'un intervalle à l'intérieur duquel se situe, avec une forte probabilité, la valeur vraie de la grandeur mesurée.
Si l'on connaît la loi de distribution de la population, on peut, à partir d'une variance connue, déterminer un intervalle de confiance correspondant à un niveau de confiance donné.
S'il s'agit, par exemple, d'une loi de distribution normale, les limites de confiances correspondant respectivement aux niveaux de confiance de 95 % et de 99 % sont voisines de 2s et de 3s. Il paraît assez évident que, sauf cas particulier, on ne connaît pas la loi de distribution de μ et que

l'hypothèse d'une distribution normale, par exemple, est assez arbitraire. On peut alors déterminer conventionnellement et indépendamment de la forme de la loi de distribution, un "intervalle d'incertitude", analogue à un intervalle de confiance, mais pris dans un sens élargi. On calcule ainsi une incertitude globale Δμ, qui est obtenue en multipliant l'écart type déterminé pour μ par un facteur conventionnel k, égal à 2 ou 3, par exemple.
Dans le cadre des chaînes d'étalonnage, nous choisissons les limites de confiance $\pm$ 3s correspondant à un niveau de confiance de 99,7 %.
L'incertitude globale s'exprimera donc sous la forme :

$\Delta\mu = \pm k\, s$

avec k >= 3

Plus récemment, (1997) **[58]** des travaux sous forme d'intercomparaison ont été entrepris dans le cadre des travaux du CIRP- Euromet par l'intercomparaison sur la mesure des plaques à billes.
A BALZAMO de l'institut Colonnetti de Turin,
M FRANKE, E TRAPET, F WALDELE du PTB en Allemagne,
L DE JONGE, P VANHERCK, de l'université catholique de Louvain en Belgique.

Le travail effectué par ces trois laboratoires est basé sur la mesure de plaques à billes à l'aide de deux machines CMM1 et CMM2..
La première à Braunschweig en Allemagne (PTB Physikalich-Technische Bundesanstalt) avec une machine dont la résolution du capteur est 0.1 µm sur une plaque de 532 x 532 mm² et la seconde sur une machine à Turin (Instituto di Metrologia G.Colonnetti) dont la résolution est 0.5 µm sur une plaque à billes de 332 x 332 mm.
La méthode de mesure applique le calcul par les polynômes de Tchébitcheff pour le laboratoire de Turin et une méthode dite de B-splines du PTB pour le laboratoire de Braunshweig et par le laboratoire de Louvain. (KUL Katholiecke Universiteit Leuven)
L'objectif est de donner un résultat de compensation globale sur les machines considérées CMM1 et CMM2.
Les deux plaques à billes ont été étalonnées au préalable par le PTB.
Les incertitudes sur les plaques varient de 1.1 µm pour la plaque de 532 x 532 et 0.9 µm pour celle de 332 x 332 avec k=2
Un premier résultat prend en compte les valeurs non compensées dans 16 positions des plaques à billes pour chacune des 2 machines.
Après un maillage sur l'étendue de mesurage de chacune des machines, chaque maille représente une parallélépipède orthogonal de 10 x 5 x 5 mm et 500 points de mesure.
Une comparaison avec un objet virtuel obtenu sur ordinateur chaque point est compensé suivant les 18 erreurs soulignées par P CHOLLET (6 erreurs par axe) .

Les résultats du tableau n° 1-4 montre les valeurs non corrigées dans la colonne de gauche et les valeurs obtenues par chaque laboratoire après modélisation des résultats.

Tableau n°1 4 Intercomparaison EUROMET

	Valeurs originales µm	Valeurs IMGC µm	Valeurs KUL µm	PTB µm
CMM1				
Std deviation	12.88	0.32	0.37	0.73
Maximum	34.75	0.90	1.11	2.48
N de positions	9	9	9	2
CMM2				
Std deviation	3.23	0.68	0.68	0.94
Maximum	11.94	2.50	2.31	3.41
N de positions	14	14	14	6

Le tableau n°1-5 donne le résultat final des intercomparaisons triangulaires après comparaison avec l'objet virtuel.

Tableau n°1 5 Après intercomparaison avec objet virtuel

	IMGC-KUL µm	IMGC-PTB µm	KUL-PTB µm
CMM1			
Std deviation	1.5	0.6	1.5
Maximum	8.2	2.3	9.0
CMM2			
Std deviation	0.004	1.0	1.0
Maximum	0.015	4.2	4.2

Les auteurs concluent qu'une première approche montre l'efficacité de la correction des machines à partir des plaques à billes.
De plus la stabilité des résultats et le maillage très fin de ces mêmes machines permet, à partir d'objets virtuels, de globaliser et de mieux appréhender les incertitudes dues aux défauts géométriques des MMC.

1-2-4-Conclusions :

La compensation par logiciel, si elle a permit de faire évoluer les MMT d'une manière très significative, ne peut pas prendre en compte toutes les incertitudes occasionnées par les différentes configurations utilisées par l'opérateur lors de la mesure .
Elle corrige les erreurs de type systématique, donc à priori ‘’connues’’ et elles peuvent donc être incluses dans le logiciel spécifique de la machine.

Mais dans un calcul d'incertitude de mesure, ce sont les valeurs des différentes erreurs estimées globalement ou calculées statistiquement qui donnent une incertitude globale. (Voir annexe D).
Les différents constructeurs donnent des incertitudes de mesure sous la forme :

A+bL

Ou A est une incertitude simplifiée et assez empirique que l'on peut assimiler à de la fidélité et b une erreur globale fonction de L (longueur de mesure).
Mais ils ne précisent pas dans quelles conditions et avec quels paramètres ces valeurs sont données.
Les normes actuelles (ISO 10360-2/VDI/VDE 2617) **[52]** sont des normes de réception globale des machines à mesurer qui permettent l'acceptation ou non d'une machine mais elles ne permettent pas de définir la réelle incertitude de mesure, car elles ne précisent pas complètement les conditions de mesure des étalons vérifiés.
Et l'intercomparaison entre différentes machines à mesurer organisée par le Bureau National de Métrologie **[7]** a permis de mettre à jour des distorsions importantes entre les incertitudes supposées par chaque opérateur et les incertitudes réelles obtenues.

1-2-5-Objectifs des travaux qui vont suivre :

Afin de faciliter l'estimation de l'incertitude d'une machine à mesurer et donc d'en tirer des conclusions sur la capabilité de mesure pour une vérification spécifique, nous proposons une série de résultats statistiques permettant d'estimer une incertitude type et par logiciel une erreur globale permettant de calculer l'indice de capabilité des moyens de mesure (CMM). (annexe E)

CHAPITRE II

2-1 ETUDE EXPERIMENTALE : DETERMINATION DE LA TAILLE DES ECHANTILLONS

2-1-1-Type de machine utilisée :

Nous avons donc décidé de travailler sur les types de machines à portique qui sont les plus représentatives du marché actuel.
La machine utilisée est une machine à déplacement motorisé équipée d'un palpeur à déclenchement et la tête est orientable suivant un angle α de 0 à 105° autour de l'axe Y et un angle β de -180 à + 180° autour de l'axe Z.

Le choix est aussi économique car ce type de machine reste dans des gammes de prix acceptables pour des entreprises moyennes.

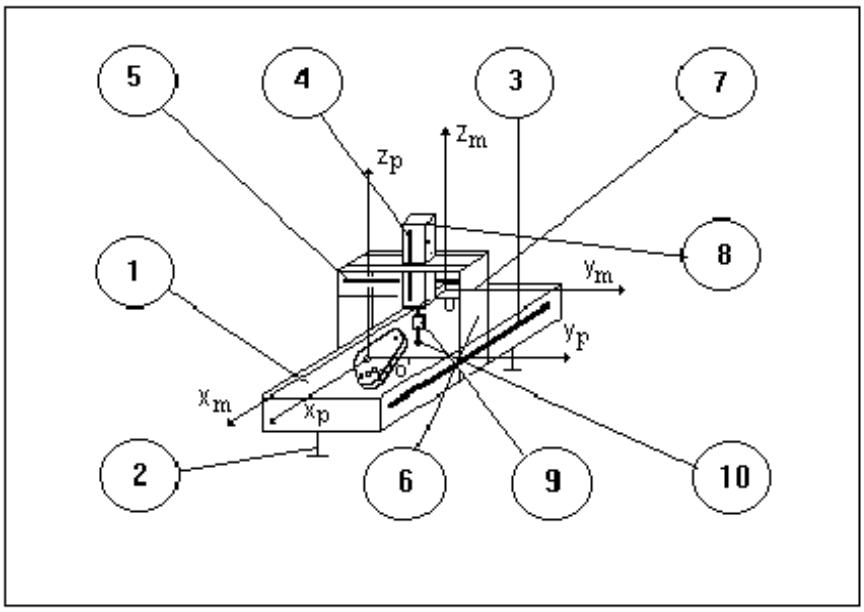
L'étude que nous allons développer portera donc sur ce type de machine, les têtes dynamiques à déclenchement sont les éléments standards chez la plupart des constructeurs actuels. Bien que la plupart des machines à mesurer se ressemblent, il nous paraît nécessaire de présenter la machine sur laquelle se sont portés nos travaux.
Après une présentation générale de ce type de machine, nous ferons une description plus détaillée de la machine utilisée (annexe A).

2-1-1-1- Description générale sommaire

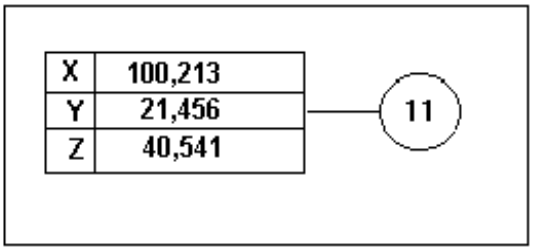
Les machines de type portique (schéma n°2-1) sont les plus utilisées en contrôle.
De nombreux constructeurs se partagent un marché en forte expansion.
Les principaux sont : BROWN ET SHARP (USA) regroupement de DEA(Italie) ,TESA(suisse), LEITZ(Allemagne) et MAUSER(Allemagne),
MITUTOYO, (Japonais) qui représente à lui seul près de 40 %., ZEISS.(Allemand)
Et un grand nombre de constructeurs de taille moins importante comme l'était TRIMESURE en France

Description des machines à portique :

fig n°2 1 description d'une machine à portique



① marbre
② pieds
③ règle x
④ règle z
⑤ règle y
⑥ portique
⑦ traverse
⑧ colonne vert
⑨ tête de palpage
⑩ palpeur
⑪ afficheur



Quand on utilise une machine à mesurer, qui est en fait une chaîne de mesure complexe, la première opération après le choix du palpeur est la qualification du ou des palpeurs.
Cette opération, toujours délicate, va conditionner tous les résultats de mesure.
Le contact palpeur/pièce est le point réel matière que l'on cherche à connaître.
La qualification a donc pour but de déterminer le rayon dynamique de la bille du palpeur.

Ce rayon, qui n'est pas le rayon réel, est calculé à partir de la mesure d'une sphère de diamètre "connue", donc avec une incertitude, et le diamètre d'une sphère calculée en considérant dans un premier temps que le palpeur est de rayon nul.
La différence entre le diamètre obtenu et le diamètre de la sphère de référence donne le diamètre dynamique du palpeur.

2-1-1-2- Les incertitudes de mesure dans ce type de chaîne de mesure :

Nous les classerons en six grandes familles :

1) *Les erreurs dépendantes de la tête de mesure*
2) *Les erreurs provenant des opérations de qualification du ou des palpeurs*
3) *Les erreurs liées à l'utilisation du logiciel*
4) *Les erreurs liées aux choix des opérateurs*
5) *Les erreurs propres à la géométrie de la machine*
6) *Les erreurs dues à l'environnement*

Les valeurs globales données par les constructeurs ne prennent pas vraiment en compte ces différents paramètres ou pour le moins ne le précisent pas.

Les points 5 et 6 sont actuellement corrigés.
Le point 3 est un des axes principaux des travaux des différents laboratoires de recherche.
Mais les points 1, 2 , et 4 demandent une meilleure analyse de la connaissance sur les résultats de mesure des paramètres utilisés.

Les plans d'expériences sur les incertitudes de mesure menés par les différents constructeurs et par des laboratoires comme le LRME sur la méthodologie de ces plans d'expérience permettent de mettre en évidence certains paramètres influents sur le résultat de mesure.

Dans notre étude, une application de ces mêmes plans d'expérience permettrait de minimiser le nombre de tests, **[53]**, mais nous avons fait un choix dicté par une meilleure définition des résultats par un nombre minimum représentatif de mesure et par une analyse systématique des covariances par des test de régression dans chacun des cas observés.

Ces paramètres influants peuvent être résumés par :
- *Nombre de points de mesure.*
- *Vitesse d'accostage.*
- *Longueur du palpeur.*
- *Diamètre de la bille de palpage.*
- *Nature du matériau du corps du stylet.*
- *Reversibilité de la tête de palpage.*
- *Erreur de repositionnement de la tête.*
- *Angle entre la direction d'accostage et la normale à la matière.*
- *Incertitudes sur la position des différents palpeurs entre eux(palpeurs étoile par exemple*).

Toutes ces erreurs, mieux connues, combinées aux erreurs de mesures des éléments et aux influences extérieures, comme température du local et de la pièce, nature du matériau mesuré etc., permettront de donner une incertitude type et une incertitude globale plus proche de la réalité et de ce fait un calcul plus rapide de l'indice de capabilité.

2-2-1- Que manque-t-il actuellement après les différents travaux effectués .

Tous les travaux déjà effectués ont porté principalement sur l'amélioration géométrique des machines par un maillage général en vue d'une correction des justesses dans le volume.
[**54],[57][58],[59],[60],[61],[62],[63],[56],[42]**
Mais actuellement, si la mesure d'un point peut être en grande partie corrigée, il reste une partie non négligeable qui est la prise en compte réelle des paramètres spécifiques qui sont identifiés au paragraphe 2-1-1-2.

Les résultats obtenus permettront après une modélisation des valeurs expérimentales de mieux connaître les incertitudes de ces machines et d'en tirer plus facilement des conclusions sur les indices de capabilité de ce type de matériel.

2-2-1-1-Définition de l'indice de capabilité :

L'indice de capabilté permet de chiffrer la valeur du rapport entre l'intervalle de tolérance de la cote mesurée et l'incertitude globale de la machine déterminée à partir des paramètres réels utilisés.

2-2-1-2- Détermination de l'incertitude de mesure

Les incertitudes de mesure doivent obligatoirement avoir été déterminées en appliquant la norme X 06-044. **[74]**
Cette norme permet d'estimer l'incertitude de mesure appelée incertitude globale ($\Delta\mu$).
Cette incertitude globale sera calculée en multipliant l'incertitude type (is) par le facteur conventionnel (k). Afin d'éviter tout litige, ce facteur (k) sera précisé dans l'expression finale du résultat.

Cela permet le choix d'un appareil de mesure adapté en fonction des tolérances à contrôler.

Après avoir estimée l'incertitude globale du moyens utilisé, on détermine un indice de capabilité appelé **Capabilité des moyens de mesure**

Il se calcule de la même manière que le PC index de la production. (annexe D)

$$CMM = \frac{IT}{\Delta\mu}$$

2-2-1-3- Rapport entre l'incertitude type (is) et la tolérance spécifiée (t)

Le rapport maximal entre l'incertitude type et la tolérance doit être spécifiée par un accord client fournisseur.
En général ce rapport est de 1/16, ce qui correspond à un rapport de 4 entre la tolérance et l'incertitude globale estimée avec k =2 (annexe D).

2-2-1-4- Critère de décision de conformité du produit

Sauf spécification particulière, compte non tenu de l'incertitude de mesure, la règle suivante sera employée :

- si le résultat de mesure est à l'intérieur de la zone **1** (bornes non exclues), le produit est déclaré conforme.
- si le résultat de mesure est à l'intérieur de la zone **2** (bornes exclues), le produit est déclaré non conforme.
- si le résultat de mesure est à l'intérieur de la zone **3**, le produit peut être déclaré conforme ou non conforme avec risques selon l'accord client fournisseur.

Quand cela est possible, il y a lieu de réduire l'incertitude de mesure. Si malgré cela le résultat est toujours dans la zone **3,** le produit sera déclaré conforme ou non conforme en fonction des risques acceptés dans l'accord client fournisseur.

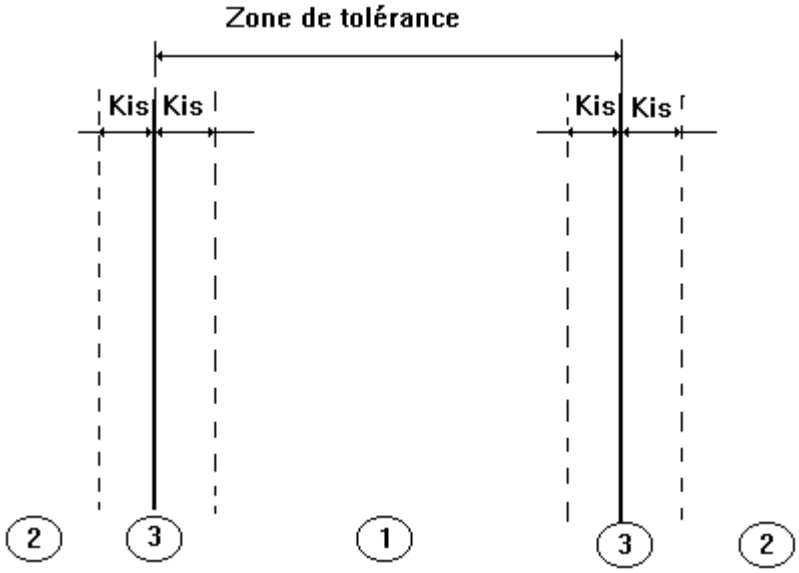


fig n°2 2 zone d'acceptation et de refus en fonction de la tolérance

En résumé, le calcul de CMM sera facilité et permettra de déterminer les calculs de capabilité en fonction des tolérances vérifiées, en ayant une meilleure connaissance de la valeur réelle de l'incertitude globale en fonction des paramètres de mesure utilisés.

2-3-1-Objectifs

Les travaux qui vont être présentés utilisent les lois de la statistique .

Les statistiques permettent de modéliser les résultats obtenus sur une échantillon représentatif de la population étudiée en vue d'une généralisation s'appuyant sur des lois connues.

Le première étude doit donc permettre de définir les lois utilisées et par la suite de déterminer la taille de ces échantillons afin de pouvoir en tirer des conclusions non biaisées dans un résultat final .

2-3-1-1- Utilisation des statistiques

Dans le paragraphe qui va suivre, après une introduction sommaire sur les méthodes statistiques, nous allons définir la taille minimum des échantillons pour mener à bien les différents calculs.

L'objectif final étant de connaître la taille des effectifs des échantillons sur lesquels nous allons travailler pour donner des résultats significatifs de la réalité. Les lois utilisées sont résumées dans l'annexe C.

2-3-1-2- Détermination de la taille de l'échantillon (n)

Déroulement:

L'étude porte sur trois séries de qualifications.

Pour permettre de définir ce nombre (n) donnant la taille significative des échantillons que nous allons étudier par la suite, nous avons réalisé trois séries de qualifications (figure n°2-3) d'un palpeur effectuées dans des conditions identiques.
Les nombres de 30, 65,100 sont basés sur des expériences antérieures que nous avions faites pour tester des appareils de mesures courants.
Cela va nous permettre de comparer les résultats obtenus et d'en tirer des conclusions sur la population " vraie" d'une opération qualification.

a) 30 qualifications (test 1)
b) 65 qualifications (test 2)
c) 100 qualifications (test 3).

Le nombre minimum est fixé à 30 de manière à utiliser la table de **Loi normale réduite** plutôt que la table de **Student**

Nous trouverons dans l'ordre :

- ***les résultats des trois tests avec les tracés des histogrammes***
- ***la population "mère" estimée à partir du test 3 et tracé de la loi normale centrée avec une méthode particulière***
- ***le premier test (khi-deux) pour confirmer l'hypothèse de normalité avec le test 3***
- ***L'effectif de 100 est-il suffisant pour caractériser une population mère?***
- ***Peut-on assimiler les deux autres tests test 1 et test 2 à des distributions suivant la même loi ?***
- ***Enfin, si c'est le cas, quelles seront les dispersions de mesures dans ces conditions ?***

2-3-1-3- Conditions de mesure :

Ces conditions de mesures (bien qu'elles soient à priori arbitraires) sont prises afin de minimiser les variations de mesures.
Certains constructeurs donnent les incertitudes de mesures dans des conditions "idéales", c'est à dire avec un palpeur le plus court possible et un stylet dont les flexions sont minimisées.

Notre choix s'est donc porté sur les conditions suivantes :

Longueur du palpeur 10mm (le plus court à notre disposition)
Diamètre de la bille de palpage 4mm
Vitesse d ’accostage 20% (vitesse volontairement très réduite pour minimiser les influences de la vitesse d’accostage).
Accostage normal en 5 points.

Nota : Nous avons réalisé un programme de mesure de manière à diriger le palpeur suivant une direction normale à la matière de la sphère. (voir annexe H : programmes de mesures)
La procédure de mesure est 1 point au pôle et quatre à l’équateur, le premier point de l’équateur est dirigé suivant l’axe X négatif.

Diamètre de la sphère de référence 15.875 mm (valeur constructeur).

Cette sphère a été étalonnée par la suite par un laboratoire accrédité et ces valeurs donnent 15.8744 mm.
Les résultats du tableau n° 2-1 donnent l’ordre des qualifications (n° de 1 à 30), les valeurs en X, Y, Z du centre de la sphère de référence fixée sur la table par rapport à un référentiel provisoire pris en manuel sur cette même sphère, la valeur du rayon déduit par la procédure et la variation de rayon de ce palpeur (appelée erreur de sphéricité par le logiciel utilisé) .

2-3-1-4- Principe de la qualification palpeur

La qualification palpeur permet de déterminer le rayon dynamique du palpeur en vue des corrections tenant compte du contact réel palpeur / matière dans les différentes mesures.
Les conditions de mesure sont précisées dans le paragraphe 2-3-1-3

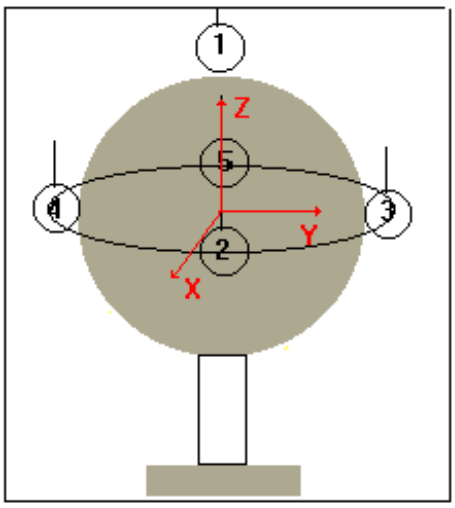


fig n°2 3 opération qualification en 5 points

.

tableau n°2 1 résultats des 30 qualifications

n° mesures	centre x=	centre y=	centre z=	Rayon =	Sphéricité =
1	0,00041	0,00003	0,00015	1,99631	0,0001
2	0,00041	0,00003	0,0004	1,99606	0,0006
3	0,00041	-0,00022	0,00027	1,99618	0,00034
4	-0,00009	0,00003	0,00064	1,99581	0,00009
5	-0,00009	0,00053	0,00039	1,99556	0,00059
6	0,00016	0,00053	0,00027	1,99568	0,00084
7	0,00041	0,00028	-0,00073	1,99618	0,00034
8	0,00016	0,00053	-0,00048	1,99593	0,00035
9	-0,00009	0,00103	-0,00111	1,99606	0,00059
10	-0,00009	0,00103	-0,00086	1,99581	0,00109
11	-0,00034	0,00078	-0,00161	1,99606	0,00009
12	-0,00009	0,00179	-0,00123	1,99568	0,00134
13	-0,00009	0,00103	-0,00211	1,99606	0,00059
14	-0,00009	0,00078	-0,00223	1,99618	0,00034
15	-0,00059	0,00153	-0,00161	1,99556	0,00059
16	-0,00034	0,00203	-0,00173	1,99568	0,00184
17	-0,00059	0,00178	-0,00248	1,99593	0,00084
18	-0,00034	0,00103	-0,00173	1,99568	0,00016
19	-0,00034	0,00153	-0,00198	1,99593	0,00034
20	-0,00109	0,00103	-0,00235	1,99581	0,0001
21	-0,00034	0,00128	-0,00236	1,99581	0,00041
22	-0,00059	0,00153	-0,00336	1,99681	0,00109
23	-0,00159	0,00153	-0,00186	1,99531	0,00091
24	-0,00084	0,00153	-0,00273	1,99618	0,00084
25	-0,00084	0,00128	-0,00235	1,99581	0,00041
26	-0,00059	0,00078	-0,00223	1,99568	0,00134
27	-0,00084	0,00128	-0,00236	1,99581	0,00041
28	-0,00034	0,00178	-0,00311	1,99606	0,00009
29	-0,00084	0,00103	-0,00323	1,99618	0,00084
30	-0,00059	0,00128	-0,00248	1,99593	0,00085
Total =	-0,0097	0,03041	-0,04619	59,87773	0,01835
Moyenne =	**-0,00032333**	**0,00101367**	**-0,00153967**	**1,99592433**	**0,00061167**
écart type	**0,00047766**	**0,00059472**	**0,00117885**	**0,00028599**	**0,00043205**

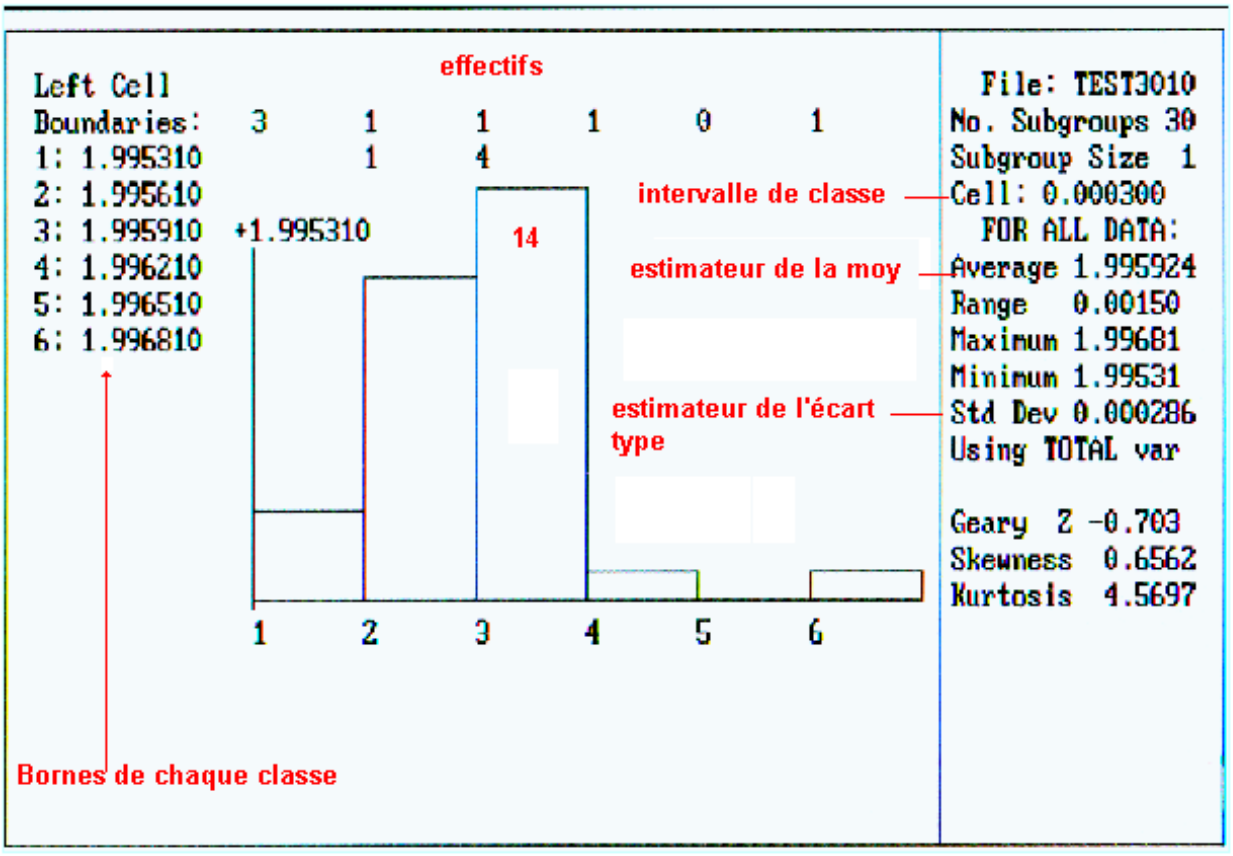
Nota : toutes les valeurs des tableaux sont données en mm.
Le tableau donne les coordonnées du centre en X, Y, Z, le rayon dynamique obtenu par différence entre une sphère des moindres carrés de rayon nul et la sphère de référence mesurée et le défaut de sphéricité estimée de la bille du palpeur.
Dans un échantillon, l'estimateur de la moyenne et de l'écart type permettent de donner la valeur "vraie" de la population et la dispersion de cette même population.
On trouve donc en fin de tableau les moyennes et les écarts type estimatif de cet échantillon.
On réalise les mêmes opérations sur des échantillons 65 et 100 échantillons.

Les tableaux n° 2-2 et n° 2-3 n’apparaissent pas complètement, seuls les récapitulatifs sont donnés.
Afin de comparer les différentes valeurs et d’en tirer une analyse statistique, tant sur la forme de la distribution que sur les dispersions probables, nous avons utilisé le logiciel Quality Alert de Penton Software inc.

En complément, j'ai du utiliser un autre logiciel, Excel, pour certaines parties de calculs spécifiques.
La méthode de calcul est développée au paragraphe **n°2-5-1.**

Dans les histogrammes qui suivent les termes suivants représentent :
Boundaries: bornes limites des classes.
Cell : intervalle de classe
Average : estimateur de la moyenne
Standard déviation : estimateur de l'écart type

Histogramme n°H-1 Test sur 30 qualifications



Nom des fichiers :
T3010 pour le fichier 30 qualifications.
test6510 pour le fichier 65 qualifications.
TEST1001 pour le fichier 100 qualifications.

tableau n°2 2 (65 mesures)

65 mesures	Centre x=	Centre y=	Centre z=	Rayon =	Sphéricité =
moyenne	0.00030154	-0.0001388	0.00006738	1.99602431	0.00049708
écart type	0.000344863	0.00043135	0.000680007	0.00025307	0.00029742

Histogramme n°H-2 Test sur 65 qualifications

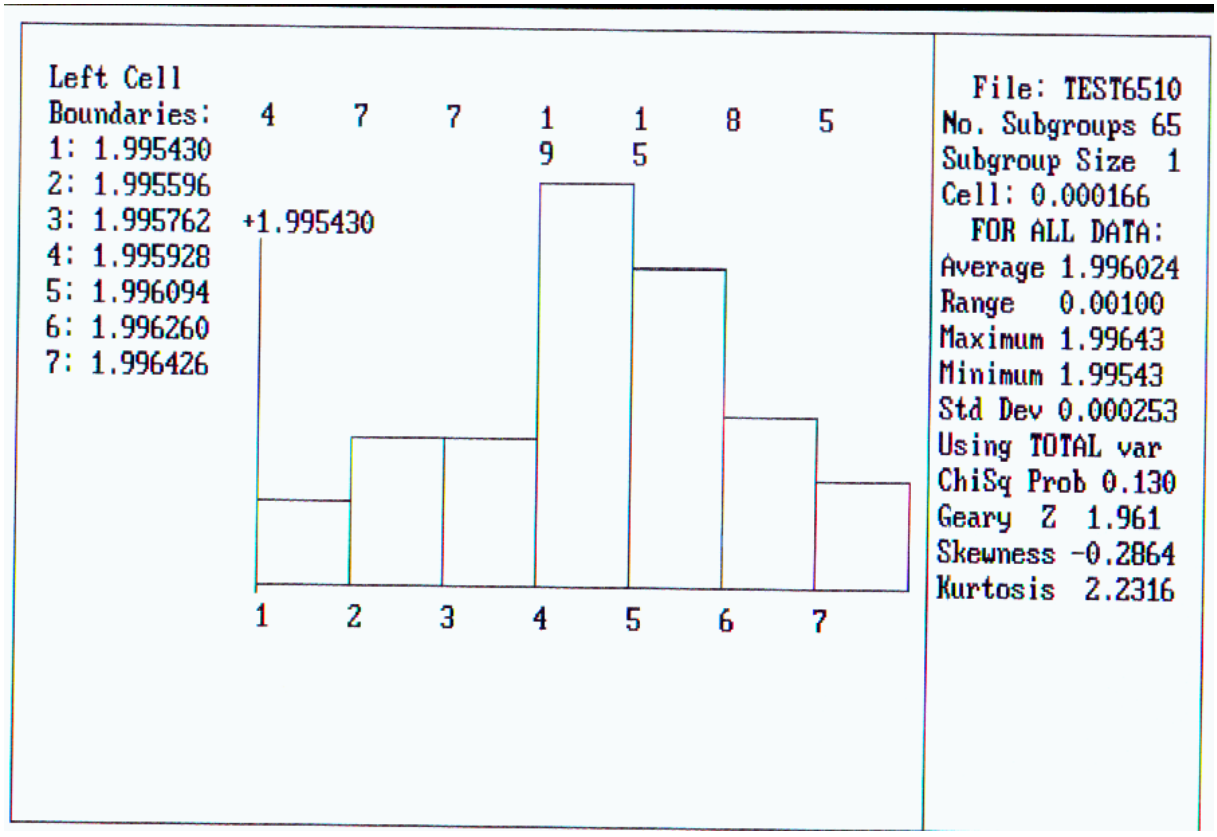
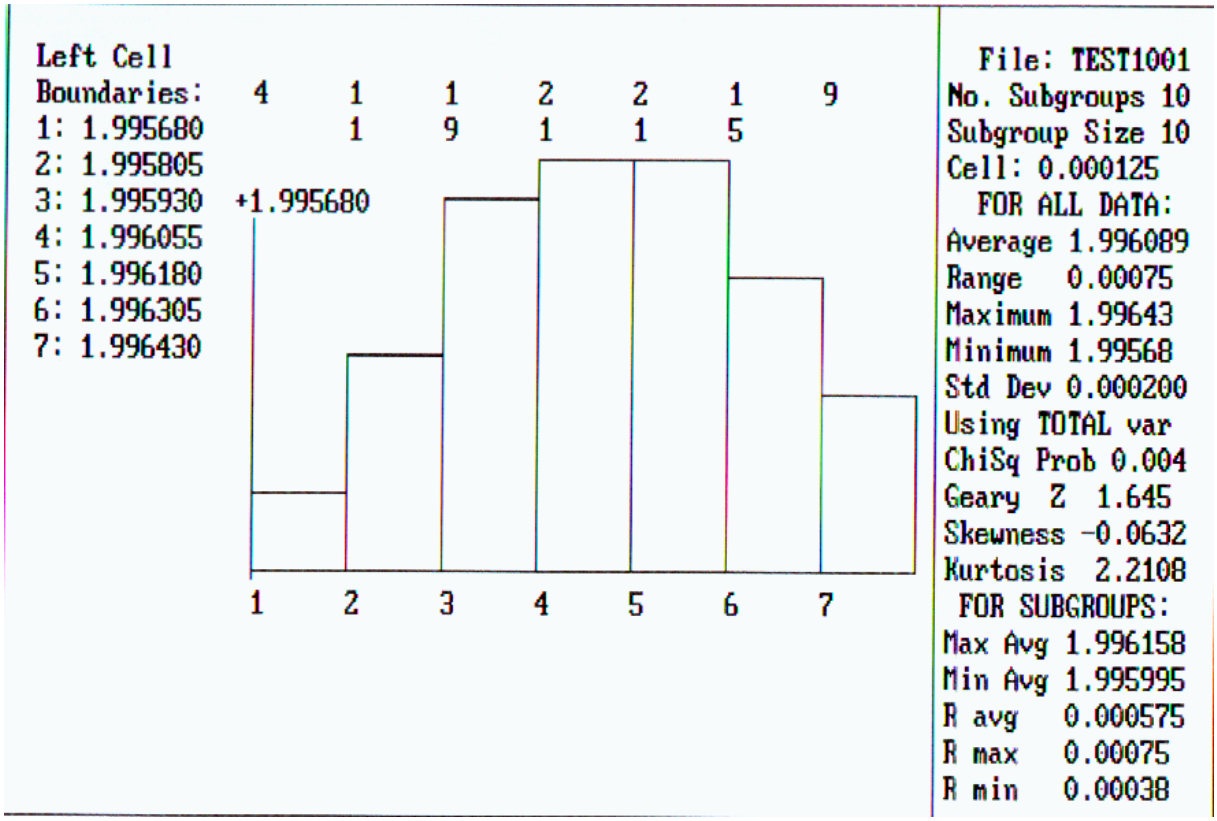


tableau n°2 3 (100 mesures)

100 mesures	**Centre x=**	**Centre y=**	**Centre z=**	**Rayon =**	**Sphéricité =**
moyenne	-0.0006575	-0.0014298	0.00010936	1.9960886	0.0003925
écart type	0.00035265	0.00041405	0.00084285	0.00020041	0.00028917

Histogramme n°H-3 test 100 mesures



Nous allons étudier le paramètre principal dans une opération de qualification c'est dire le rayon dynamique.

2-4-1 Variation du rayon dynamique du palpeur

En prenant comme base d'analyse les variations du rayon du palpeur :

2-4-1- 1- Réalité d'une loi normale

Les deux questions qui nous sont posées sont :
Peut-on assimiler l'histogrammen°3 du tableau n° 2-3 à une distribution dont le modèle mathématique est une loi normale ?

2-4-1-2 Intervalle de confiance de la moyenne

2eme question :
Si c'est le cas, quel est l'intervalle de confiance de la moyenne estimée.

Pour répondre à la première question il faut d'abord tracer la loi normale réduite avec les estimateurs de la moyenne et de l'écart type donnés par le test 3.
Nous allons supposer que ces estimateurs sont les valeurs "vraies" de la population et donc que nous pouvons tracer la loi normale réduite.
Ensuite nous effectuerons un premier test dit du khi-deux pour valider ou non cette hypothèse.

2-5-1- Méthode pour tracer de la loi normale réduite avec les limites de classe de l'histogramme.

On suppose que la population est une loi normale $F(X) = N(\mu, \sigma(x))$.
de rayon moyen = 1,996089
d'écart type =0,0002004
La méthode que je propose permet de comparer l'effectif expérimental obtenu à l'effectif "théorique" que nous obtiendrions si on connaissait la totalité de la population mère.
1)on calcule pour chacune des bornes (colonne 1 tableau n°4-1-9) de classes la valeur de U (2).
formule **u=** $(xi - \bar{x}) / s(x)$ avec
xi = valeur de la borne inférieure
$\bar{x}$ = estimateur de la moyenne
s(x)= estimateur de l'écart type
2)la valeur de u est ensuite donnée en pourcentage (colonne 3 tableau n°4-1-9) en consultant la table de loi normale réduite (#4-1-2).
3)La colonne 4 tableau n°4-1-9 donne l'effectif théorique par classe
ex : classe comprise entre les bornes 1,99568 et 1,995805 (classe 1)

$$u1 = \frac{1.99568 - 1.996089}{0.000200} = -2.045 \qquad u2 = \frac{1.995805 - 1.996089}{0.0002} = -1.42$$

u1 dans la table n°4-1-9 donne 0.9795 mais comme u est négatif 1-0.9795=0.0025
u2 par le même calcul donne 0.9222 soit le complément 0.0078.
Ce qui donne en %
u2-u1= 7,78 – 2,05 = 5.73%.
4)La colonne 5 tableau n°2-4 est l'effectif réel trouvé dans la classe (sur 100 mesures).

5) Calcul du maximum
Le maximum de la courbe donne 24.76 pour u= 0.

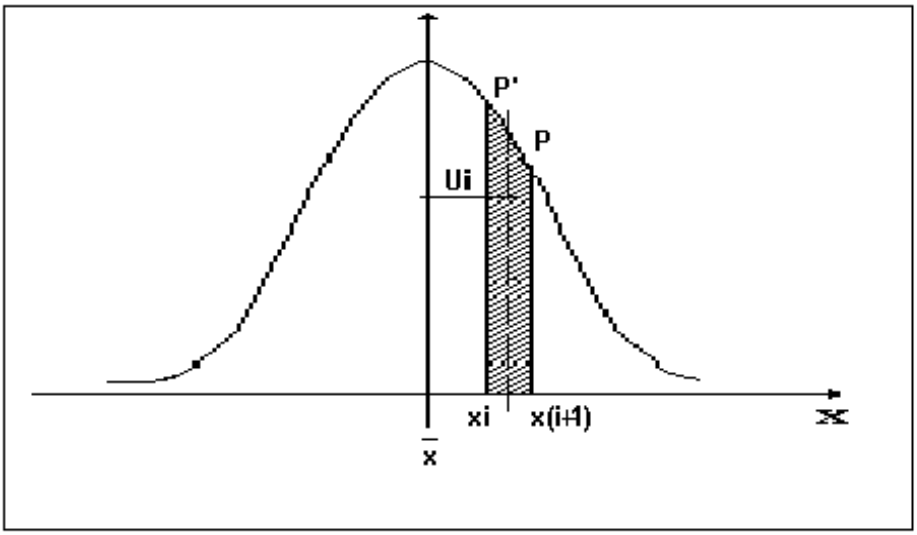


fig n°2-3 Méthode empirique de calcul du maximum **:**

L'effectif théorique dans un intervalle donné (entre deux bornes) correspond à la probabilité (p) par rapport à la probabilité (P) de l'ensemble de la population.

Le calcul de l'effectif théorique dans un intervalle de classe donné est la différence des probabilités pour les valeurs de (xi)et de (xi+1).
Prenons comme exemple l'intervalle de classe compris entre les valeurs de 1.996180 et 1.996305.
La probabilité théorique donnerait 0.1845 et un pourcentage de 18.45 %.
Dans notre expérimentation 18.45 individus sur 100.
La valeur de la densité de probabilité pour la médiane de cette classe est :

$$f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}^{\exp\frac{-u^2}{2}}$$

Soit pour la valeur médiane de cet intervalle de classe **0.2971652**

Quand u=0 la valeur f(u) est égale à **0.3989422**
(annexe C)

Le maximum de la courbe devient dans ce cas là :

$$f(x) = \frac{18.45 * 0.3989422}{0.2971652} = 24.76$$

Le tableau n°2-4 montre la comparaison entre les valeurs théoriques et les valeurs expérimentales de l'échantillon test1001 pris comme population mère.

tableau n°2 4 effectif théorique et expérimental

Bornes inférieures xi (1)	**U(i)=** (xi – $\bar{x}$) / s(x) **(2)**	**% théorique donné par table loi N réduite (annexe B) (3)**	**%théorique par classe(ni') U(i+1)-U(i) en % (4)**	**Effectif expérimental par rapport à 100 par classe (ni) (5)**
1.99555	-2.663	0.39	1.66	0
1,99568	-2,045	2,05	5,73	4
1,995805	-1,42	7,78	13,55	11
1,99593	-0,795	21,33	21,92	19
1,996055	-0,17	43,25	24,29	21
1,99618	0,455	67,54	18,45	21
1,996305	1,08	85,99	9,6	15
1,99643	1,705	95,59	3,42	9
1,996555	2,33	99,01	0,99	0
	moyenne	1,996089	Ecart type=0.0002	Maxi courbe théorique 24,76

La figure n°2-4 montre les courbes théoriques avec les estimateurs de la moyenne et de l'écart type considérés comme "vrais" et la répartition expérimentale obtenue.

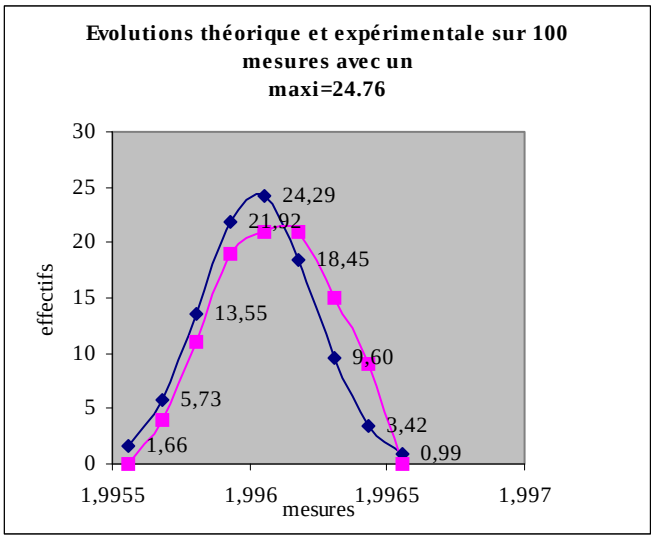


fig n°2 4 Evolution des courbes théoriques et expérimentales

Conclusion:

En consultant les deux courbes ci-dessus (figure n°2-4), on constate que les répartitions sont très proches une de l'autre.

Nous allons confirmer cette première hypothèse par le test du khi-deux.

2-6-1--Test du khi-deux

Les deux courbes obtenues dans la figure n°2-4 montrent une cohérence entre les courbes théorique et expérimentale.
Mais il est nécessaire de confirmer cette cohérence par des tests mathématiques permettant d'affirmer avec une plus grande rigueur cette hypothèse de normalité.
J'effectue donc un premier test, le test du khi-deux.
Ce test permet de calculer la somme des carrés des écarts entre les densités de probabilité par classe des valeurs expérimentales et théoriques.
La colonne (6) du tableau 2-5 donne la somme des écarts unitaires entre les valeurs théoriques et les valeurs expérimentales par classe :
L'intervalle de classe (cell) est fixé à 0.000125

Test du khi-deux **$\Sigma(ni-ni')^2 / ni'$**

tableau n°2 5 tracé de la courbe théorique et calcul du khi² pour un intervalle de classe (cell) = 0.000125

Bornes inférieures xi (1)	**U(i)=** $(xi - \bar{x})$ / s(x) **(2)**	**% théorique donné par table loi N réduite (annexe B) (3)**	**%théorique par classe(ni') U(i+1)-U(i) (4)**	**Effectif expérimental par rapport à 100 par classe (ni) (5)**	**Calcul de (ni-ni')²/ni' (6)**
1.99555	-2.663	0.39	1.66	0	1.66
1,99568	-2,045	2,05	5,73	4	0,5223
1,995805	-1,42	7,78	13,55	11	0,4799
1,99593	-0,795	21,33	21,92	19	0,3890
1,996055	-0,17	43,25	24,29	21	0,4456
1,99618	0,455	67,54	18,45	21	0,3524
1,996305	1,08	85,99	9,6	15	3,0375
1,99643	1,705	95,59	3,42	9	9,1042
1,996555	2,33	99,01	0,99	0	0,9900
	moyenne	1,996089	Ecart type=0.0002	Maxi courbe théorique 24,76	**Σ (ni-ni')²/ni'** 16.98

L'histogramme de la figure n°2-5 montre les écarts entre la distribution théorique et la distribution expérimentale pour une population «mère » telle que F(X) = N(µ, σ(x)) pour µ =1.996089 et σ(x)=0.000204

La figure n°2-5 représente la distribution des effectifs théoriques et expérimentaux.

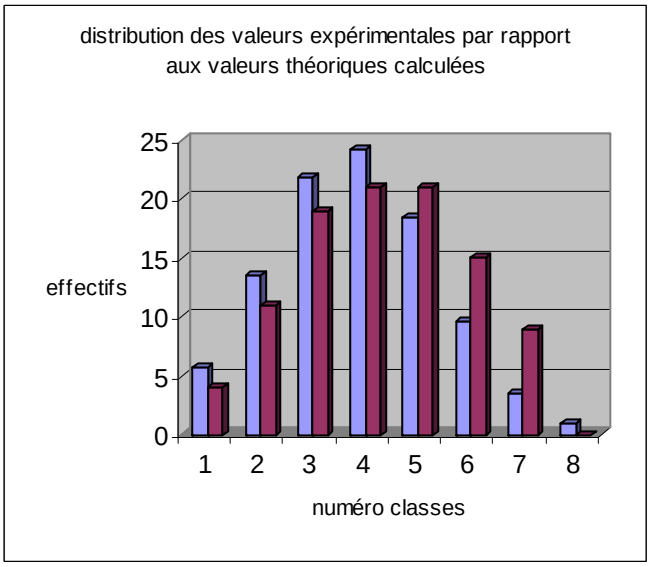


fig n°2 5 *Histogramme des valeurs théoriques et valeurs expérimentales (100 mesures*)

Conclusions sur ce test :

Pour une loi normale F(X) = N(µ, σ(x)) avec $\bar{x}$= 1.996089 et s=0.0002004

La table N°3 des fractiles de la loi du khi² **[75]**(norme NFX06-072) donne pour une valeur de ν =6 (nombre de classes-3) avec un niveau de confiance de 0.99 =16.75.

Le Khi² expérimental calculé =16.98 reste du même ordre que le Khi² théorique , on peut à priori supposer que l'on se trouve en présence d'une distribution de type Gaussien.
Mais ce test donnant des valeurs limites, nous proposons deux autres tests, pour confirmer ou pas cette première hypothèse.
Peut-on considérer que 100 valeurs sont suffisantes pour définir la population mère ?

Nota : M. A.Allisy,**[36]** du Conservatoire national des Arts et Métiers proposait une courbe de la variation des fréquences et donnait comme valeur minimum de la taille des échantillons de n=150. Je pense que pour ma part 100 qualifications suffisent.
En effet, si nous traçons une courbe représentant les variations de ±3s(x)/ racine de n :

(figure n°2-6), on constate que l'intervalle de confiance de la moyenne est pratiquement le même pour 100 et 150 valeurs.

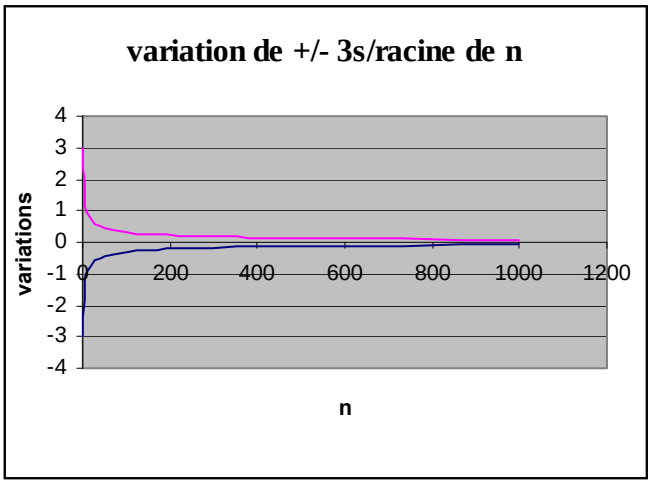


fig n°2 6 Variation de la moyenne en fonction de n

Les schémas n°2-4 et 2-5 permettent tout de même de montrer que 100 qualifications donnent des valeurs très significatives sur la valeur "vraie" de la population mère.

L'intervalle de confiance de la moyenne sur le test1001 de l'histogramme n°3 donne avec s(x) =0.0002 et p=0.9973 une valeur en mm de

$$\pm \frac{3*0.0002}{\sqrt{100}} = \pm 0.00006$$

et donc inférieure à la résolution de l'afficheur.

2-6-2- Conclusions *:*

Un effectif de 100 est suffisant pour évaluer la population "mère".

2-7-1- Test de Shapiro-Wilk [34] [50]

Nous réalisons les deux tests sur les échantillons de 30, car cela va nous permettre de vérifier si la taille de 30 qualifications est significative et proche de la "population mère"(test 1001).

Ce test est fondé sur le rapport **W** de deux estimations liées à la variance de la population dont provient l'échantillon.

L'une est fonction des étendues partielles

$x_n - x_1, x_{n-1} - x_2 ...$

Que l'on peut déduire de la suite ordonnée de

$x_1 \leq x_2 \leq ... \leq x_n$

des n observations indépendantes d'un échantillon d'effectif n, et l'autre Z^2 qui est fonction des carrés des écarts à la moyenne des observations.
L'effectif concerné et le test 3010 donné par le tableau 3-0-3-1 car si ce test confirme l'hypothèse d'une normalité, c'est à dire que l'effectif est suffisant, nous pourrons pour la suite des mesures, utiliser des effectifs limités à 30.
Les paramètres du calcul sont :

$d_i = \sum x_n - x_1, x_{n-1} - x_2 .....$

$a_i = coeff$

$W = \frac{b^2}{Z^2}$

$k = \frac{n}{2} différences$

$b = \sum_{i=1}^{k} a_i d_i$

$Z^2 = \sum_{j=1}^{n} (x_j - \bar{x})^2$

Le coefficient (ai) est donné par la table B.4a (NFX 06-050 page 31) (tableau n°2-6)qui prend en compte n=30 et i=n-1/2 soit 14.
Ce coefficient est dans ce cas 0.0227.
La table B.4b page 33de cette même norme(tableaux n°2-7 et2-8) préconise de rejeter l'hypothèse de normalité si la valeur de W est inférieure à 0.927 pour un risque à 5% et 0.900 pour un risque à 1%.

tableau n°2 6 Table des coefficients ai pour le test W de shapiro-Wilk

Table B.4a (suite)

i \ n	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
1	0,432 3	0,429 1	0,425 4	0,442 0	0,418 8	0,415 6	0,412 7	0,409 6	0,406 8	0,404 0	0,401 5
2	0,299 2	0,296 8	0,294 4	0,292 1	0,289 8	0,287 6	0,285 4	0,283 4	0,281 3	0,279 4	0,277 4
3	0,251 3	0,249 9	0,248 7	0,247 5	0,246 3	0,245 1	0,243 9	0,242 7	0,241 5	0,240 3	0,239 1
4	0,215 1	0,215 0	0,214 8	0,214 5	0,214 1	0,213 7	0,213 2	0,212 7	0,212 1	0,211 6	0,211 0
5	0,185 7	0,186 4	0,187 0	0,187 4	0,187 8	0,188 0	0,188 2	0,188 3	0,188 3	0,188 3	0,188 1
6	0,160 1	0,161 6	0,163 0	0,164 1	0,165 1	0,166 0	0,166 7	0,167 3	0,167 8	0,168 3	0,168 6
7	0,137 2	0,139 5	0,141 5	0,143 3	0,144 9	0,146 3	0,147 5	0,148 7	0,149 6	0,150 5	0,151 3
8	0,116 2	0,119 2	0,121 9	0,124 3	0,126 5	0,128 4	0,130 1	0,131 7	0,133 1	0,134 4	0,135 6
9	0,096 5	0,100 2	0,103 6	0,106 6	0,109 3	0,111 8	0,114 0	0,116 0	0,117 9	0,119 6	0,121 1
10	0,077 8	0,082 2	0,086 2	0,089 9	0,093 1	0,096 1	0,098 8	0,101 3	0,103 6	0,105 6	0,107 5
11	0,059 8	0,065 0	0,069 7	0,073 9	0,077 7	0,081 2	0,084 4	0,087 3	0,090 0	0,092 4	0,094 7
12	0,042 4	0,048 3	0,053 7	0,058 5	0,062 9	0,066 9	0,070 6	0,073 9	0,077 0	0,079 8	0,082 4
13	0,025 3	0,032 0	0,038 1	0,043 5	0,048 5	0,053 0	0,057 2	0,061 0	0,064 5	0,067 7	0,070 6
14	0,008 4	0,015 9	0,022 7	0,028 9	0,034 4	0,039 5	0,044 1	0,048 4	0,052 3	0,055 9	0,059 2
15		0,000 0	0,007 6	0,014 1	0,020 6	0,026 2	0,031 4	0,036 1	0,040 4	0,044 4	0,048 1
16				0,000 0	0,006 8	0,013 1	0,018 7	0,023 9	0,028 7	0,033 1	0,037 2
17						0,000 0	0,006 2	0,011 9	0,017 2	0,022 0	0,026 4
18								0,000 0	0,005 7	0,011 0	0,015 8
19										0,000 0	0,005 3

tableau n°2 7 table des valeurs limites

Table B.4b : Table des valeurs limites W_α de $W = \frac{b^2}{z^2}$ pour les risques α = 5 % et 1 %

(Biometrika 1965)

n	Risque 5 %	Risque 1 %
	$W_{0,05}$	$W_{0,01}$
5	0,762	0,666
6	0,788	0,713
7	0,803	0,730
8	0,818	0,749
9	0,829	0,764
10	0,842	0,781
11	0,850	0,792
12	0,859	0,805
13	0,866	0,814
14	0,874	0,825
15	0,881	0,835
16	0,887	0,844
17	0,892	0,851
18	0,897	0,858
19	0,901	0,863
20	0,905	0,868
21	0,908	0,873
22	0,911	0,878
23	0,914	0,881
24	0,916	0,884
25	0,918	0,888
26	0,920	0,891
27	0,923	0,894
28	0,924	0,896
29	0,926	0,898
30	0,927	0,900
31	0,929	0,902
32	0,930	0,904
33	0,931	0,906
34	0,933	0,908
35	0,934	0,910
36	0,935	0,912
37	0,936	0,914
38	0,938	0,916
39	0,939	0,917
40	0,940	0,919
41	0,941	0,920
42	0,942	0,922
43	0,943	0,923
44	0,944	0,924
45	0,945	0,926
46	0,945	0,927
47	0,946	0,928
48	0,947	0,929
49	0,947	0,929
50	0,947	0,930

L'hypothèse est rejetée si W est inférieur à la valeur tabulée en fonction de n, pour le risque choisi.

EXEMPLE :

n = 20, W = 0,795, α = 0,05.

L'hypothèse de normalité est rejetée.

Le tableau n°2-8 des calculs donne :

tableau n°2 8 test de Shapiro-Wilk

n°mesures	Valeurs du rayon	valeurs croissantes	valeurs décroissantes	di	ai	ai*di	xi²
1	1,99631	1,99531	1,99681	-0,0015	0,4254	-0,0006381	3,98525362
2	1,99606	1,99556	1,99631	-0,00075	0,2944	-0,0002208	3,98425552
3	1,99618	1,99556	1,99618	-0,00062	0,2487	-0,00015419	3,98473459
4	1,99581	1,99568	1,99618	-0,0005	0,2148	-0,0001074	3,98325756
5	1,99556	1,99568	1,99618	-0,0005	0,187	-9,35E-05	3,98225971
6	1,99568	1,99568	1,99618	-0,0005	0,163	-8,15E-05	3,98273866
7	1,99618	1,99568	1,99618	-0,0005	0,1415	-7,075E-05	3,98473459
8	1,99593	1,99568	1,99606	-0,00038	0,1219	-4,6322E-05	3,98373656
9	1,99606	1,99581	1,99606	-0,00025	0,1036	-2,59E-05	3,98425552
10	1,99581	1,99581	1,99606	-0,00025	0,0862	-2,155E-05	3,98325756
11	1,99606	1,99581	1,99606	-0,00025	0,0697	-1,7425E-05	3,98425552
12	1,99568	1,99581	1,99606	-0,00025	0,0537	-1,3425E-05	3,98273866
13	1,99606	1,99581	1,99593	-0,00012	0,0381	-4,572E-06	3,98425552
14	1,99618	1,99581	1,99593	-0,00012	0,0227	-2,724E-06	3,98473459
15	1,99556	1,99593	1,99593	0	0,0076	0	3,98225971
16	1,99568	1,99593	1,99593				3,98273866
17	1,99593	1,99593	1,99581				3,98373656
18	1,99568	1,99593	1,99581				3,98273866
19	1,99593	1,99606	1,99581				3,98373656
20	1,99581	1,99606	1,99581				3,98325756
21	1,99581	1,99606	1,99581				3,98325756
22	1,99681	1,99606	1,99581				3,98725018
23	1,99531	1,99606	1,99568				3,981262
24	1,99618	1,99618	1,99568				3,98473459
25	1,99581	1,99618	1,99568				3,98325756
26	1,99568	1,99618	1,99568				3,98273866
27	1,99581	1,99618	1,99568				3,98325756
28	1,99606	1,99618	1,99556				3,98425552
29	1,99618	1,99631	1,99556				3,98473459
30	1,99593	1,99681	1,99531				3,98373656
Σ xi	59,87773				b=	-0,00149816	119,511421
(Σ xi)²	3585,34255				b²	2,2445E-06	
Σ xi²	119,5114207		**W=b²/Z²**	**0,946269**			
(Σ xi)²/30	119,5114183						
Z²	2,37194E-06						

Conclusion 1 :

La valeur du test est supérieure à la valeur de la tableau n°2-8 (B.4b NFX60-050), qui est de 0,927 avec un risque à 5%, ce qui signifie que l'hypothèse de normalité est acceptée avec un risque α inférieur à 5%.

2-8-1- Test de Kogomorov-Smirnov [34] [50]

Ce test, qui est une adaptation par la norme NFX-06-050 du test de Kolgomorov-Smirnov est fondé sur la comparaison de la loi Normale Normale F(x)=N(μ,σ) avec (μ et σ estimés par x et s) avec la loi de probabilité Fn(x) à partir d'un échantillon de n individus.
On désigne par F(x) la fonction de la loi normale centrée et on pose :

$$u_i = F\left[\frac{x_i - \bar{x}}{s(x)}\right]$$

s(x) est l'écart type (n-1).
On calcule D+ = max (i/n-ui)
D- = max (ui-(i-1/n)) ou 1>= i >= n .
Et la statistique modifiée

$$T(D) = D(\sqrt{n} - 0.01 + \frac{0.85}{\sqrt{n}})$$

Nous l'avons réalisé sur le même échantillon de 30 qualifications. (test3010)

tableau n°2 9 test de Kolgomorov-Smirnov

n°mesures	Valeurs rayons	(xi-xmoy)/s(x)	Zi = Fréquence théorique	i/n-zi (D+)	z1-(i-1)/n (D-)
1	1,99531	-2,14808539	0,01585343	0,0174799	0,01585343
2	1,99556	-1,27393235	0,10134376	-0,03467709	0,06801043
3	1,99556	-1,27393235	0,10134376	-0,00134376	0,03467709
4	1,99568	-0,8543389	0,19645857	-0,06312524	0,09645857
5	1,99568	-0,8543389	0,19645857	-0,0297919	0,06312524
6	1,99568	-0,8543389	0,19645857	0,00354143	0,0297919
7	1,99568	-0,8543389	0,19645857	0,03687476	-0,00354143
8	1,99568	-0,8543389	0,19645857	0,0702081	-0,03687476
9	1,99581	-0,39977932	0,34465958	-0,04465958	0,07799291
10	1,99581	-0,39977932	0,34465958	-0,01132624	0,04465958
11	1,99581	-0,39977932	0,34465958	0,02200709	0,01132624
12	1,99581	-0,39977932	0,34465958	0,05534042	-0,02200709
13	1,99581	-0,39977932	0,34465958	0,08867376	-0,05534042
14	1,99581	-0,39977932	0,34465958	0,12200709	-0,08867376
15	1,99593	0,01981414	0,50790422	-0,00790422	0,04123755
16	1,99593	0,01981414	0,50790422	0,02542911	0,00790422
17	1,99593	0,01981414	0,50790422	0,05876245	-0,02542911
18	1,99593	0,01981414	0,50790422	0,09209578	-0,05876245
19	1,99606	0,47437371	0,68238327	-0,04904994	0,08238327
20	1,99606	0,47437371	0,68238327	-0,01571661	0,04904994
21	1,99606	0,47437371	0,68238327	0,01761673	0,01571661
22	1,99606	0,47437371	0,68238327	0,05095006	-0,01761673
23	1,99606	0,47437371	0,68238327	0,08428339	-0,05095006
24	1,99618	0,89396717	0,81433031	-0,01433031	0,04766364
25	1,99618	0,89396717	0,81433031	0,01900303	0,01433031
26	1,99618	0,89396717	0,81433031	0,05233636	-0,01900303

27	1,99618	0,89396717	0,81433031	0,08566969	-0,05233636
28	1,99618	0,89396717	0,81433031	0,11900303	-0,08566969
29	1,99631	1,34852675	0,91125543	0,05541124	-0,02207791
30	1,99681	3,09683281	0,99902193	0,00097807	0,03235526
	1,99592433				
	0,00028599	D+ =	0,12200709		
		D- =	-0,08867376		
		T(D)=	0,81344841		

Ce deuxième test confirme le premier, la valeur de T(D) étant inférieure à la valeur limite donnée par la table B.5(tableau n°2-10) de la même norme (soit 0.895) avec un risque inférieur à 5%.

tableau n°2 10 table B5

Niveau %	Limite
15.0	0.775
10.0	0.819
5.0	0.895
2.5	0.995
1.0	1.035

Interprétation : l'hypothèse est rejetée si T(D) est inférieur à la valeur tabulée pour le risque choisi, ce qui n'est pas le cas dans notre test.

Conclusions.

Les deux tests de Shapiro et de Kolgomorov-Smirnov montrent pour l'échantillon de 30 étudié confirme une hypothèse d'appartenance à la même population mère.

Nous conclurons donc que les échantillons de taille 30 sont suffisants pour l'étude de normalité.

Et par conséquent, sauf dans le cas de mesures spécifiques, la taille des effectifs sera réduite à 30 mesures pour chaque expérimentation.

2-9-1- Cent qualifications caractérisent la population mère

Le nombre de 100 caractérisant l'effectif de la population mère donne un intervalle de confiance de la moyenne non nul.

2-9-1-1--Incertitude sur la moyenne de l'échantillon pris comme population mère (risque à 5 %) :

En prenant comme estimateur du rayon $\overline{x}$ = 1.996089 et comme estimateur de l'écart type s(x)=0.0002,
On obtient pour n=100 :
Intervalle de confiance bilatéral de la moyenne (95%): $\overline{x}$ +/- $2\,s(x)/\sqrt{n}$

Maxi:	**1.9961282**
mini:	**1.9960498**

Soit une incertitude à +/- 0.00004 mm que l'on va considérer comme négligeable.

Intervalle de confiance bilatéral de l'écart type (95%): s(x) +/- 2 $s(x)/\sqrt{n}$

Maxi:	**0.00024**
mini:	**0.00016**

Soit une incertitude à *+/- 0.00004 mm que l'on va considérer comme négligeable*
Avec une erreur de quantification de l'afficheur à 0.0001mm, les valeurs significatives sont inférieures à la valeur de résolution de l'afficheur.

Reprenons maintenant les tests N°1(30) et N°2(65). (histogramme n° etn°2 # 4-1-10)
Nous considérons maintenant que les limites de l'intervalle de confiance du test n°3 (100 mesures) deviennent les limites à 99,73% du rayon dynamique "vrai"(donc de la population).

Limites de confiance de la moyenne =1.996089 ± 3*0.0002
Maxi 1.9961409
Mini 1.996029
Limites de confiance de l'écart type = 0.0002 ± 3*0.0002/ (racine 100)

Maxi 0.00026
Mini 0.00014

Résolution de l'afficheur ± 0.0001 mm

Les valeurs du test n°2 sont
Test 6510 (test n°2)
$\bar{x}$ = 1.996024 et s(x)=0.0000256
On les compare aux valeurs du test n°3
Conclusion :
Pour le rayon les valeurs sont inférieures au mini mais sont dans la résolution de l'afficheur.
Pour l'écart type, la valeur est en dehors des limites mais reste la aussi dans la résolution de l'afficheur.
On réalise la même comparaison pour le test n°1 par rapport au test n°3
TEST 3010: (test n°1)
$\bar{x}$ = 1.995924 et s(x)=0.0000286.

Conclusion :
Les deux valeurs sortent des prévisions, mais restent la aussi dans la résolution de l'afficheur.

Peut on dire par contre que les trois échantillons qui sont caractérisés par les trois histogrammes (1, 2 et 3) qui semblent suivre une distribution de type gaussien donnent des valeurs significatives ?

En prenant l'échantillon n°3 comme population mère, on obtient la dispersion probable sur une qualification en 5 points avec un niveau de confiance à 0.9973 (u=3)
Maxi: 1.996689
mini: 1.995489
Le risque α est très faible 0,27%(0.135%+0.135%) (figure n°2-7).

Ce schéma montre la dispersion sur le rayon dynamique avec un seuil de confiance de 0.9973. Attention les valeurs inférieures et supérieures sont arrondies par le logiciel.

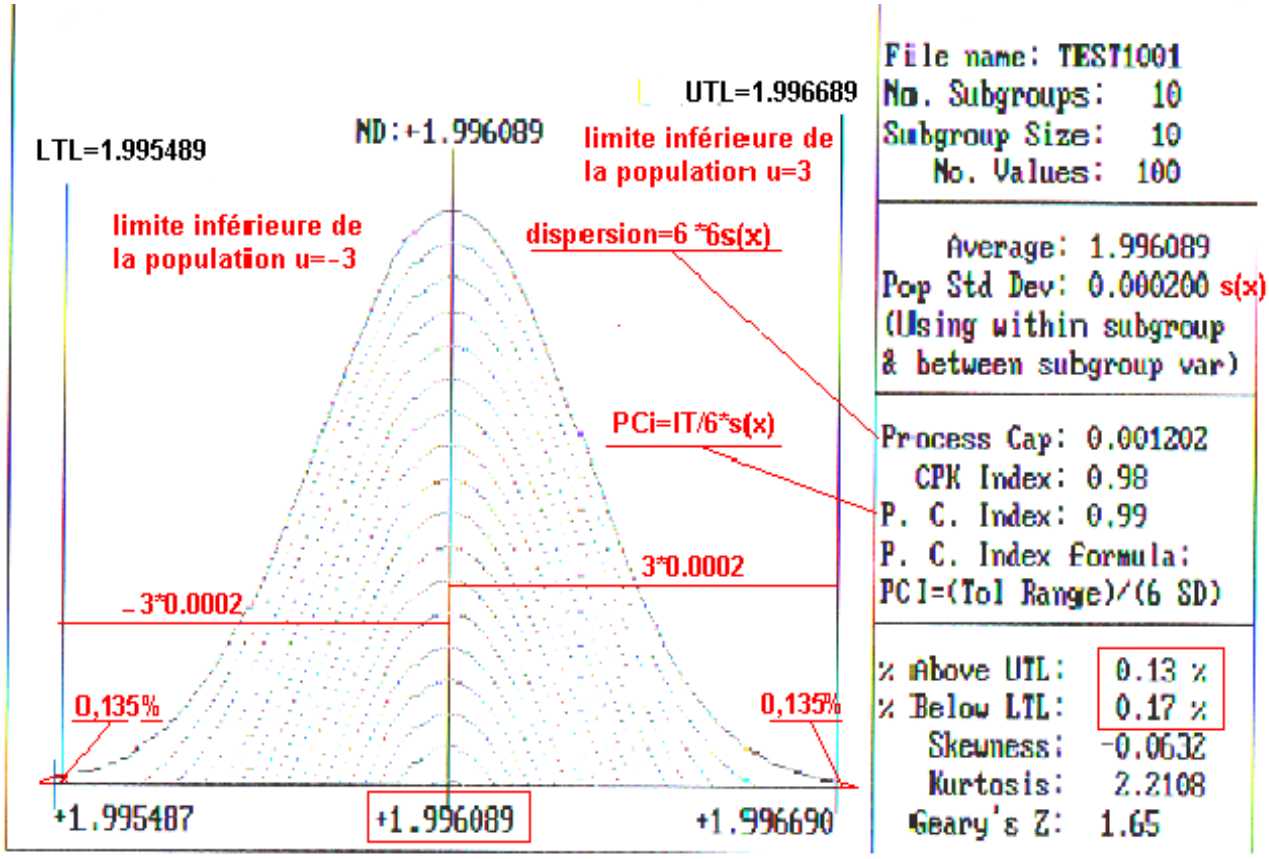


fig n°2 7 Dispersion de mesure à ± 3 s(x) sur 100 qualifications

Les tests du Skewness (test de position) du Kurtosis (densité) et du Geary's Z sont donnés par le logiciel Qalert mais ne concernent pour notre étude.

Dans les deux échantillons n°2 et n°1, les valeurs des moyennes et écarts type diffèrent de la population mère.
En utilisant Qalert, nous pouvons évaluer les risques dans la définition du rayon dynamique avec les limites probables de la population mère représentée par l'échantillon n°3.
Pour l'échantillon N°2 (fig n°2-8)
Le calcul confirme que la dispersion est validée à 97,89 %.

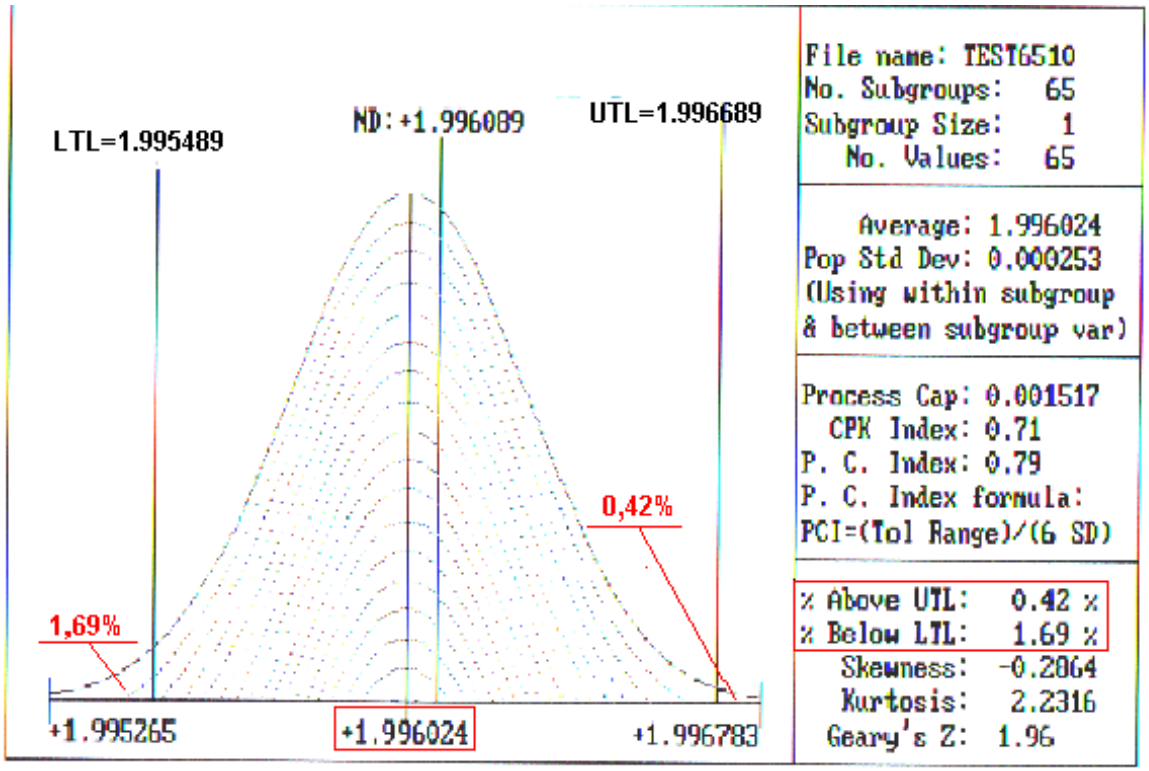
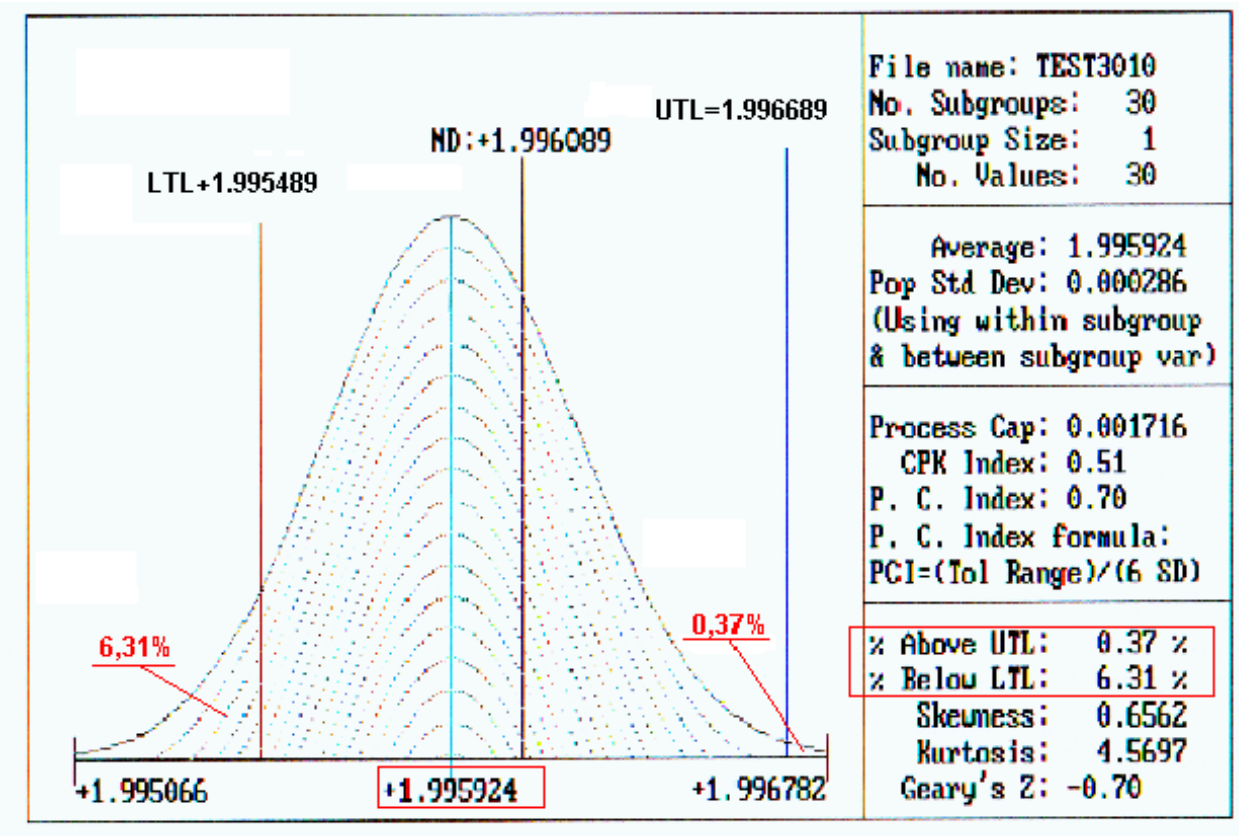


fig n°2 8 Calcul du risque α pour 65 qualifications

Le risque α est de : 2,11% (1,69 + 0,42), donc minime.

Pour l'échantillon n°1, un calcul similaire (figure n°2-8) donne :



+fig n°2 9 Calcul du risque α sur 30 qualifications

Le risque α est de : 6.68%

Calcul :
Pour le risque inférieur on a 6.31%, et le risque supérieur est de 0.37%.
Conclusions :Les résultats obtenus nous permettent de confirmer(*) que notre choix définitif de 30 mesures est une estimation suffisante pour la suite des mesures.
(*) La règle des incertitudes pour tous les laboratoires européens d étalonnage est un calcul avec un risque à 0.05 soit U=95%.
Soit une confirmation très proche de 95%.

Mais une question reste posée.

2-9-1-2-Pourquoi une différence entre les valeurs moyennes des rayons entre les trois tests ?

Plusieurs hypothèses possibles dont deux sont prévisibles :

a) Influence purement statistique entre des populations différentes**.**
Les tests précédents prouvent que les populations sont identiques.
b) Influence de la variation de température sur le diamètre de la sphère de référence.
❖ L'enregistrement des variations thermiques du laboratoire ou se trouve notre machine est de 20° ± 0.5°
❖ Nous estimons qu'une variation possible de la sphère de référence est de 20° ± 0.2° pendant les mesures.

Le diamètre de la sphère de référence (15.875 mm) varie de :

$$u(\Delta t) = L.\alpha.\frac{\Delta t}{\sqrt{2}}$$

ou $u(\Delta t)$=incertitude due à la variation de température
L = diamètre de la sphère
α =Coefficient de dilatation linéique de la sphère
Δt = Ecart de température par rapport à 20°.
Nota: La loi de variation dans le cas d'un système régulé de température est assimilée à une loi en dérivée d'arc sinus [annexe C].
et dans ce cas $V(\Delta t) = \frac{\Delta t^2}{2}$

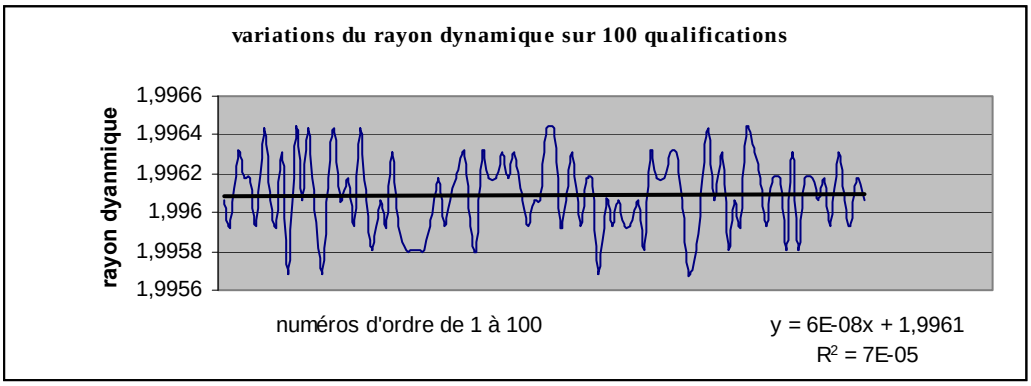
$$\alpha = 12 * 10^{-6} * C^{-1} / °$$

On considérera que l'incertitude sur le coefficient α et l'influence sur le diamètre de la bille sont négligeables. (α=coefficient de dilatation linéique)
Ce qui donne :

$u(\Delta t) = (15.875x12x10^{-6} x\frac{0.2}{\sqrt{2}}) = 0.00027$ mm sur le diamètre de la sphère de référence

et donc : 0.000135 sur le rayon.
Conclusion:
Le calcul du rayon dynamique se faisant par différence entre le diamètre de la sphère des moindres carrés passant par le centre des billes de palpage et le rayon théorique de la sphère de référence, on peut penser que les écarts observés entre 30, 65 et 100 mesures sont plus dues à des écarts résultant du temps de mesure entre ces trois opérations qu'à des phénomènes purement statistiques (différences de populations).

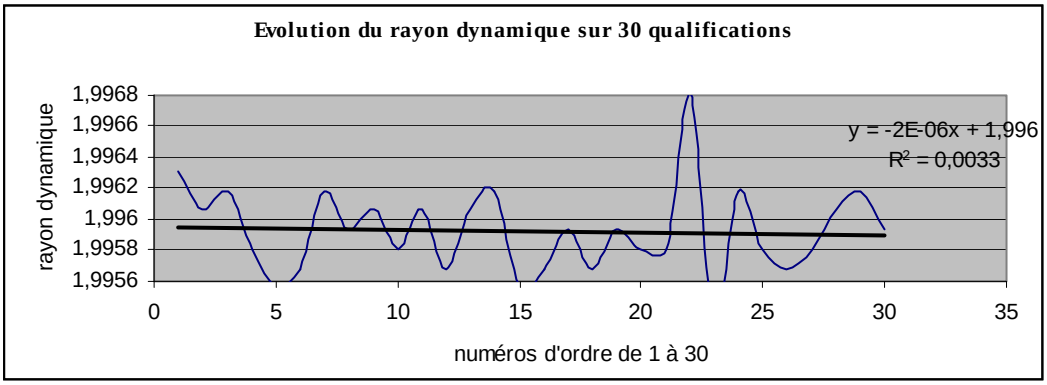
Pour le montrer, nous avons réalisé les graphiques n°2-1 et 2-2 qui montrent l'évolution des rayons en fonction du temps (nombre de qualifications)
Le graphique n°2-1 donne l'évolution du rayon sur 100 qualifications en 5 points. La tendance est nulle, et donc peu influencée par la variation de l'environnement thermique.



graphique n°2 1 Evolution du rayon sur 100 qualifications

:

L'évolution sur 30 qualifications est plus sensible, mais elle reste dans des valeurs incluses dans la résolution de l'afficheur.



graphique n°2 2 Evolution du rayon sur 30 qualifications

:

Les valeurs de l'équation linéaire y = a x + b sont données sur le graphique ainsi que R^2 qui est le coefficient de détermination.

définitions:

S(x) et S(y): estimateurs des écarts type de X et Y.
V(x) et V(y): estimateurs des variances de X et Y
Covariance = cov (x, y)

$$\mathrm{cov}(x,y) = \frac{\sum(xi-\bar{x})(yi-\bar{y})}{n-1}$$

a= pente

$$a = \frac{\mathrm{cov}(x,y)}{V(x)}$$

$$b = \bar{y} - a * \bar{x}$$

$$r^2 = \left[\frac{\mathrm{cov}(x,y)}{V(x)*V(y)}\right]^2$$

2-9-1- Conclusions :

Nous constatons effectivement que sur 30 qualifications le rayon est plus sujet à une variation de température, car le temps de mesure est plus court alors que sur 100 qualifications le temps de mesure couvre plusieurs cycles thermiques et donc régulé statistiquement.
En effet la fréquence d'inversion par cycle complet de la climatisation est de l'ordre de 15 minutes.
Le temps de mesure par séquence unitaire de qualification est 30 secondes pour 5 points avec une vitesse de 1.6m / mn.
Ce qui donnerait un cycle pour 30 mesures et plus de 3 cycles pour 100 mesures.
Cela pourrait expliquer la légère tendance sur 30 qualifications que l'on ne retrouve pas sur 100 qualifications.
Conclusions:
Je considérerais donc que les écarts sont dus principalement à des variations de phénomènes thermiques.

2-10-1- récapitulatifs sur les variations :

Les tableaux n°2-11 et n°2-12 donnent les récapitulatifs des variations sur les rayons et sur les écarts type des 3 séries de qualifications.

tableau n°2 11 Récapitulatif des variations sur les moyennes ::

nombre mesures en qualification	Moyenne x	Moyenne y	moyenne z	moyenne rayon	Moyenne sphéricité
30	-0,0003233	0,001014	-0,00154	1,995924	0,000612
65	0,0003015	-0,000139	0,0000067	1,996024	0,000497
100	-0,0006575	-0,001429	-0,0010936	1,996089	0,0003925

tableau n°2 12 Récapitulatif sur les variations des écarts type

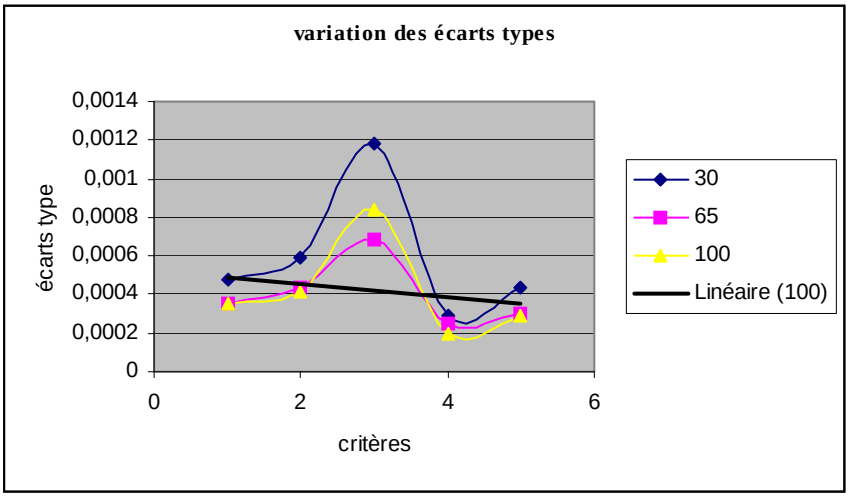
:nombre mesures en qualification	écart type x	écart type y	écart type z	écart type rayon	écart type sphéricité
30	0,0004776	0,000595	0,0011788	0,000286	0,0004321
65	0,000348	0,000431	0,0006807	0,000253	0,0002974
100	0,0003526	0,000414	0,0008428	0,0002	0,0002892

Nous constatons sur le tableau n°2-12 une similitude des variations d'écart types qui caractérise la valeur de fidélité de la tête de palpage.

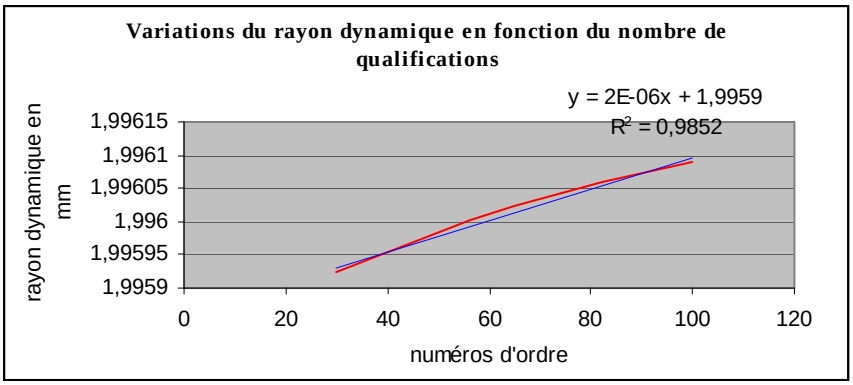
.

Mais le tableau n° 2-11fait apparaître une évolution du rayon en fonction du nombre de qualifications.

graphique n°2 3 évolution du rayon en fonction des écarts type



La pente très faible(inférieure à la résolution) du graphique n° 2-4 pourra être prise en compte s'il s'avère que le phénomène de dérive n'est pas uniquement du à un phénomène thermique.
Nous mettons en évidence dans ce graphique une valeur plus importante des écarts type pour les Z.
Lors de mesures d'éléments, notamment le point, cette tendance devra être vérifiée.



graphique n°2 3 variations du rayon en fonction du nombre de qualifications : 30,65,100.

Conclusion :
Le nombre de qualifications a une influence sur la détermination du rayon dynamique dans une opération qualification.
Il n'y a peut être pas qu'une évolution thermique.

2-11-1- Evolution des résultats en fonction du nombre de qualifications.

Pour pouvoir conclure cette partie, il nous a semblé important de reprendre les tableaux de mesure d'une manière différente.

Peut-on dire que la variation du rayon dynamique est totalement linéaire en fonction du nombre de qualifications ?

Sur les trois séries (30, 65, 100 qualifications), nous avons repris les valeurs obtenues dans les trois tableaux du n°2-1, n°2-2 et n°2-3
Les 10 premières valeurs de chaque série permettent de calculer le rayon moyen et l'écart type moyen.

$$\overline{x}_{10}; \overline{s}(x_{10})$$

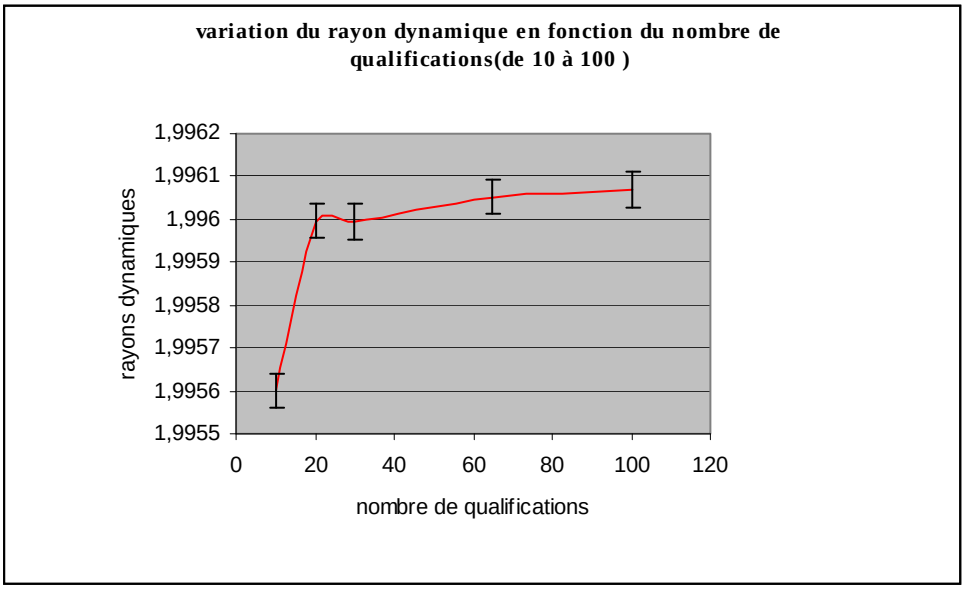
Puis un calcul identique est exécuté sur les 20 premières qualifications de chaque série.
Et enfin sur les 30 premières de chaque série.

Sur les deux séries (65 et 100 mesures), nous avons pris les 65 premières de celle de 100 et la série 65.
Et les résultats de la série de 100.

Ce qui donne le tableau n°2-13

tableau n°2 13 récapitulatif des moyennes et des écarts type en fonction du nombre de qualifications :

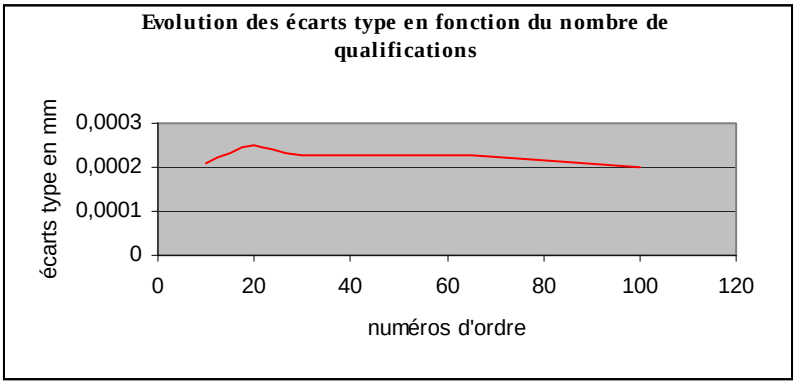
nombre qualifications	moyennes	écarts types
10	1,99560157	0,00021005
20	1,99599667	0,00024933
30	1,9959946	0,00022756
65	1,9960523	0,00022831
100	1,996089	0,00020041



graphique n°2 4** variation du rayon dynamique en fonction du nombre de qualifications (de 10 à 100 qualifications **) :

Nous constatons que le rayon dynamique évolue en fonction du nombre de qualifications. Mais, la stabilisation des résultats intervient au-delà de 20 qualifications et à partir de 30 qualifications la courbe est identique à celle du graphique n°2-6

Conclusion :
Le choix de 30 qualifications est suffisant pour notre étude, car le résultat sur le rayon se stabilise à partir de 20 qualifications.
Ce paragraphe, très important, va nous permettre maintenant de poursuivre nos travaux en nous basant sur des modules de taille 30.



graphique n°2 5 *évolution des écarts type en fonction du nombre de qualifications* **:**

Conclusions :
La valeur des écarts type se stabilise avec 30 qualifications au minimum.

2-12-1- Conclusions générales du chapitre 2:

Les séries de mesure pour chacun des paramètres étudiés seront limitées à 30, les valeurs des écarts type obtenus sont suffisamment représentatives pour la suite de l'étude. (incertitude de type A)
Par contre pour l'analyse sur les erreurs de type B (justesse et forme), notamment pour la mesure d'éléments, nous ne pouvons nous prononcer et nous devrons éventuellement effectuer un plus grand nombre de mesures.

CHAPITRE III

3-1- ETUDE EXPERIMENTALE SUR LA QUALIFICATION DU PALPEUR ET MODELISATIONS DES RESULTATS

3-1-1-Objectifs

Le chapitre III va analyser les différents paramètres qui peuvent influer sur les résultats de la qualification d'un palpeur.

Nous trouverons parmi ces paramètres :
- Le nombre de points de palpage
- La vitesse
- L'angle d'accostage (suivant la normale ou quelconque)
- La longueur du palpeur
- Le diamètre de la bille
- La répétabilité de repositionnement des têtes orientables.
- La nature du corps du stylet (pas étudié)

En fin de ce chapitre, la modélisation permettra de minimiser les incertitudes en choisissant les critères les mieux adaptés aux mesures à réaliser.

3-2-1-Introduction

Le chapitre précédent nous a permit de déterminer le rayon dynamique d'un palpeur ainsi que l'incertitude sur ce rayon dynamique à partir d'une série de 30 qualifications.
L'opération qualification a été effectuée en 5 points, un au pôle et 4 à l'équateur.
Voyons maintenant l'influence du nombre de points de mesure dans cette opération de qualification. La plupart des constructeurs préconisent l'opération qualification en 5 points, d'autres offrent des procédures en 9 points voire plus.
L'opération qualification peut se faire soit en automatique avec un accostage suivant les axes -Z, +X, +Y, -X, -Y dirigés vers le centre de la sphère de référence, c'est dire avec un accostage

normal à la matière, soit suivant des directions et des points de contact quelconques ne respectant pas un accostage normal.

.

3-3-1-Influence du nombre de points de palpage et de la vitesse dans l'opération qualification.

Lors de l'opération qualification, la plupart des opérateurs qualifient le ou les palpeurs en 5 ou 9 points. On a fait vérifier la sphère de référence par un établissement accrédité et son défaut de sphéricité est considéré comme négligeable (<0.0001mm).

Nous allons comparer les résultats donnés sur une qualification en 5 points et 9 points.

3-3-1-1-La qualification palpeur est primordiale en mesure 3D.

Cette opération permet à la machine de connaître le point de contact réel de la matière lors de l'accostage. (figure n°3-1)
En effet, lors de l'accostage du palpeur sur la matière, les coordonnées données par les règles sont les coordonnées du centre C de la bille, mais le point intéressant pour la mesure est en fait le point P de la pièce.
L'opération qualification a donc pour but de déterminer la valeur du rayon dynamique du palpeur, cette valeur étant ajoutée ou soustraite lors des mesures (diamètres, longueurs etc.).

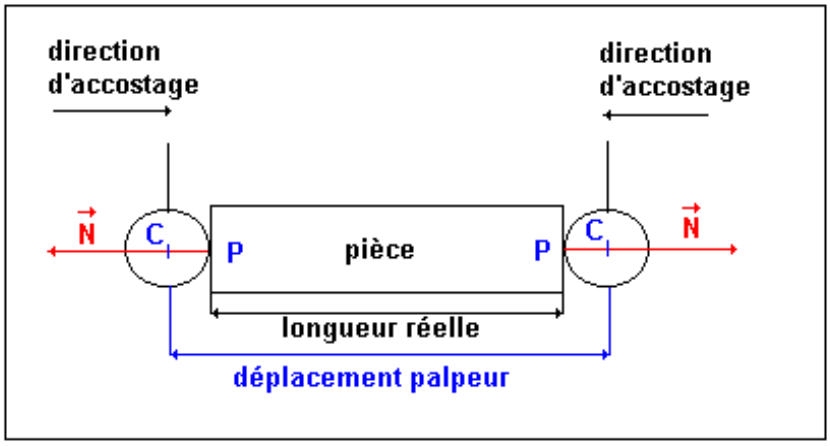


fig n°3 1 Déplacement du palpeur et longueur réelle

3-4-1-Qualification en 9 points avec accostage normal :

Conditions de mesure :
La procédure donnée par le constructeur ne prévoyant qu'une répartition d'un point au pôle et et les autres points à l'équateur, nous avons réalisé un programme spécifique (annexe H programme de mesures) afin d'assurer un accostage normal, 1 point au pôle, 4 points au tropique et 4 points à l'équateur suivant les axes machine Z, X+, Y+, X-, Y-.le vecteur d'accostage dirigé vers le centre de la sphère de référence (fig n°3-2)

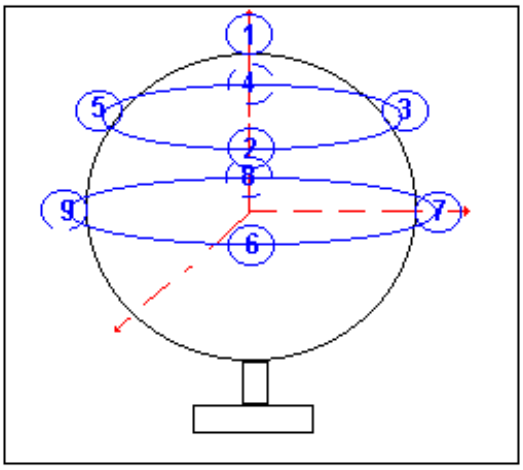


fig n°3 2 Qualification en 9 points

Le choix de la longueur du palpeur de 50 mm est volontaire afin de mieux faire apparaître les différences, un palpeur de 50mm donnant à priori des écarts plus importants qu'un palpeur de 10 mm

Conditions de mesure :
- Palpeur longueur 50mm
- Vitesse d'accostage variant de 20 à 100% de la vitesse moyenne (8 mètres/minute)
- Diamètre de la bille 4mm

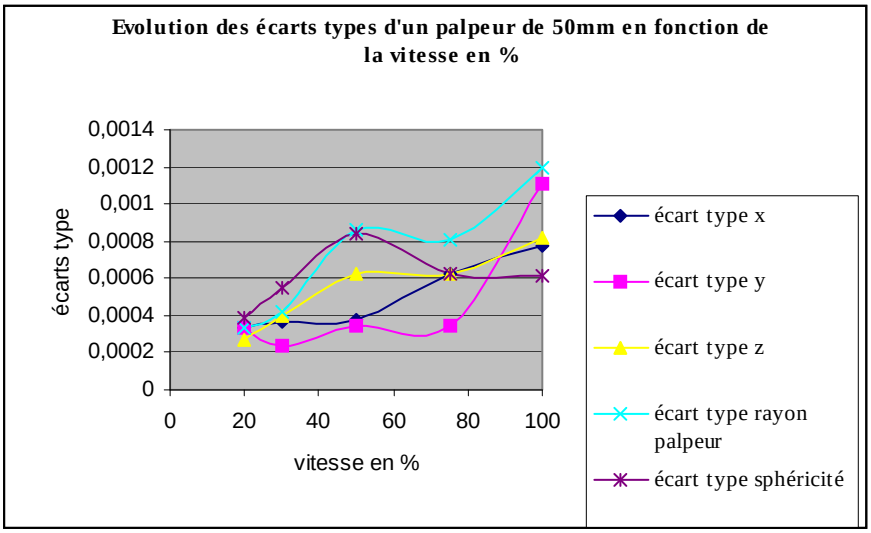
tableau n°3 1 Résultat de la qualification en 9 points

palpeur 50	écart type x	écart type y	écart type z	écart type rayon palpeur	écart type sphéricité	Coefficients Multiplicateurs sur l'écart type du rayon
vit 20%	0.00033	0.00033	0.00027	0.00033	0.00039	
vit 30%	0.00037	0.00024	0.00040	0.00042	0.00055	**1,3**
vit 50%	0.00038	0.00034	0.00063	0.00086	0.00084	**2,6**
vit 75%	0.00062	0.00034	0.00063	0.00081	0.00062	**2,5**
vit 100%	0.00078	0.00111	0.00082	0.00120	0.00061	**3,6**

Coefficient multiplicateur entre 30 et 20 % = 0.00042/0.00033 = 1,3.
50 et 20% = 0.00086/0.00033 = 2.6 et ainsi de suite

Le graphique n°3-1 tiré du tableau n°3-1 permet de visualiser les variations des écarts type en fonction de la vitesse (30 mesures pour chacune des vitesses de mesures).

graphique n°3 1 évolution des écarts type en fonction de la vitesse d'accostage



Le graphique n°3-1 montre une évolution des écarts type en fonction de la vitesse. (9 pts)

Si nous prenons comme base la variation des écarts type sur le rayon dynamique, les coefficients multiplicateurs donnés par le tableau 3-1 passent de 1,3 à 3,6.
On retrouve des coefficients similaires pour les autres paramètres.

Conclusion partielle :
La qualification devra être réalisée à vitesse lente (20 à 30 %), sous peine d'une augmentation très importante des écarts type, dommageable pour la précision de cette opération.

3-5-1-Qualification avec accostage normal en 5 points :

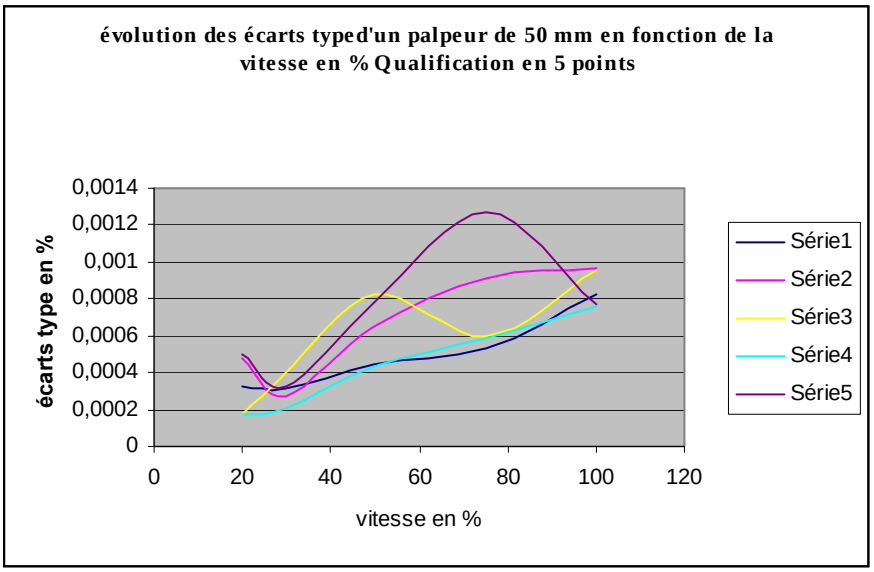
- Palpeur longueur 50mm
- Vitesse d'accostage de 20 à 100%
- Diamètre de la bille 4mm

1 point au pôle, 4 points à l'équateur. (même programme que pour le paragraphe 4-1-10)
Le tableau n°3-2 donne les résultats obtenus

tableau n°3 2 Ecarts type sur un palpeur de 50mm en 9 points

palpeur 50	écart type x=	écart type y=	écart type z=	écart type palpeur =	écart type sphéricité	Coefficients Multiplicateurs sur l'écart type du rayon
vit 20%	0.00033	0.00048	0.00017	0.00017	0.00050	
vit 30%	0.00032	0.00027	0.00040	0.00021	0.00033	**1,2**
vit 50%	0.00045	0.00065	0.00082	0.00043	0.00078	**2,5**
vit 75%	0.00053	0.00091	0.00060	0.00059	0.00127	**3,5**
vit 100%	0.00083	0.00097	0.00095	0.00076	0.00077	**4,5**

Le tableau n°3-2 fait apparaître des coefficients multiplicateurs sur les écarts type sur le rayon variant de 1.2 à 4.5 suivant les vitesses. (en mm)



graphique n°3 2 évolution des écarts type en fonction de la vitesse d'accostage

Le graphique n°3-2- (qualification en 5 points) donne des tendances similaires que le graphique n°3-1 (qualification en 9 points).
L'écart type du rayon est plus faible en 5 points qu'en 9 points, ce qui est statistiquement compréhensible, mais les coefficients multiplicateurs sont sensiblement équivalents.
Les autres paramètres sont dans des valeurs équivalentes.

Conclusion partielle :
La qualification du palpeur devra être réalisée à vitesse lente (<3.2 m/mn) sous peine d'une augmentation très importante des écarts type, dommageable pour la précision de cette opération.

3-5-2-Conclusion sur l'influence de la vitesse sur les écarts type :

Au vu de ces résultats, il apparaît une certaine cohérence dans les résultats.
En prenant comme exemple les valeurs des écarts type pour une même vitesse, (20%), on constate que les résultats sont équivalents entre la qualification en 5 points et en 9 points.
Par contre, les variations sont beaucoup plus importantes dans une qualification en 5 points dès que la vitesse augmente.
Il faut donc qualifier le palpeur en 9 points plutôt qu'en 5 points si on veut effectuer des mesures à grande vitesse.

Nota: On obtient des résultats similaires sur des qualifications en 19 points (1 au pôle, 9 au tropique et 9 à l'équateur) avec toutefois une augmentation de la sphéricité du palpeur.

Conclusions générales sur la variation des écarts type en fonction du nombre de points dans la qualification.
Le nombre de points en qualification n'apparaît pas très important à vitesse lente mais on doit augmenter le nombre de points en qualification si on effectue les mesures d'une pièce avec des vitesses importantes.

Comparaison des diamètres obtenus :
La conclusion précédente est-elle confirmée pour les valeurs des rayons dynamiques ?
Le tableau n°3-3 montre les résultats sur les opérations de qualification en 9 points et en 5 points.

tableau n°3 3 évolution des écarts type en fonction de la vitesse d'accostage

Vitesses en %	Rayon en 9 points	Rayon en 5 points
20	1.98294	1.98409
30	1.98297	1.98428
50	1.98283	1.98467
75	1.98268	1.98441
100	1.98291	1.98645

Le graphique n°4-2-9 montre une meilleure stabilité des rayons dynamiques dans la procédure en 9 points à toutes les vitesses.
Pour les vitesses lentes les rayons obtenus restent stables en 5 points et en 9 points.
Quant aux valeurs du rayon dynamique, les écarts obtenus entre les deux procédures (tableau n°4-1-20) montrent que les écarts observés donnent une variation significative du rayon moyen légèrement supérieure au micromètre, sauf pour une vitesse maximum de 100% (8m/mn) ou l'écart est plus significatif.

Que donne la qualification avec un plus grand nombre de points ?
Le tableau suivant n°3-4 montre une analyse sur un capteur du même modèle avec trois qualifications :
5 points, 9 points, 19 points :

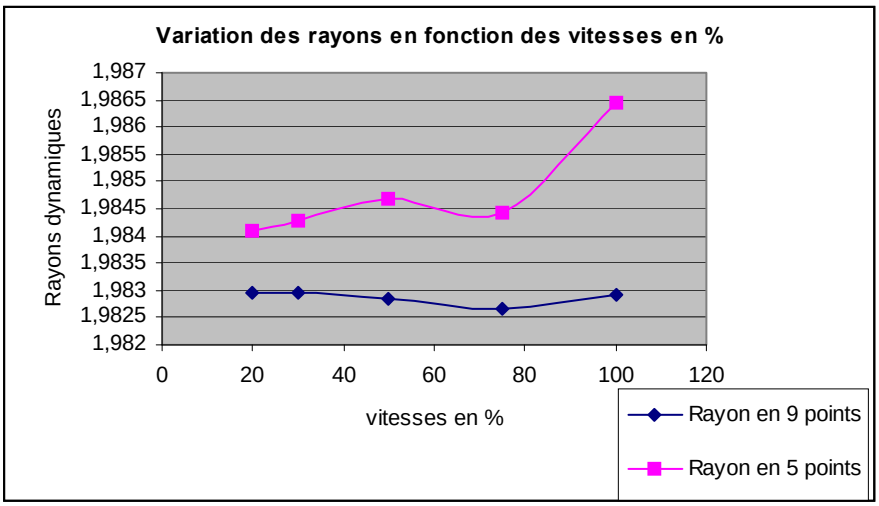
tableau n°3 4 variation du défaut de sphéricité

Nombre de points	Défaut de sphéricité en mm
5	0.0024
9	0.0069
19	0.0096

On voit bien sur ce tableau l'influence du nombre de points sur le calcul du défaut de circularité.
La variation du diamètre moyen provient plus du calcul du défaut de sphéricité dépendant d'un défaut de triangulation de la tête de mesure que d'une erreur de sphéricité de la bille du palpeur de 4 mm de diamètre.
Nous reviendrons sur ce phénomène dans le contrôle de bagues de référence.
Conclusion:
La qualification avec un nombre supérieur à 9 points n'est pas nécessaire, car elle perturbe le résultat en incluant un défaut de sphéricité qui n'est pas réel, mais qui provient plus du défaut de triangulation de la tête de mesure.

3-6-1-Influence de la vitesse sur la qualification :

Le graphique n°3-3 représente les variations données par le tableau n°3-3



graphique n°3 3 variations du rayon en fonction de la vitesse

3-7-1- Accostage quelconque en 5 points :

Le but de ce paragraphe est montrer l'influence éventuelle d'une qualification réalisée en manuel. Le choix sur la longueur du palpeur (50 mm), permettra d'effectuer des comparaisons entre les deux procédures (qualification en 5 points en automatique avec accostage normal ou en manuel en accostage quelconque).
Conditions de mesure :

- Palpeur longueur 50mm
- Vitesse d'accostage dépendant de l'opérateur, mais le potentiomètre est réglé la même position que pour l'accostage précédent.
- Diamètre de la bille 4mm
- 1 point au pôle et 4 points à l'équateur, avec un angle pouvant varier de 5 ° environ par rapport à la normale de palpage.

Le premier point en Z puis en X+, Y+, X-, puis Y-.

tableau n°3 5 Tableau comparatif sur les écarts type entre les qualifications automatique et manuelle.

Résultats en mm

palpeur 50 (manuel)	**écart type x=**	**écart type y=**	**écart type z=**	**écart type rayon**	**écart type sphéricité =**
Vitesse 50%	0.00124	0.00280	0.00255	0.00232	0.00254
palpeur 50 Automatique	**écart type x=**	**écart type y=**	**écart type z=**	**écart type rayon**	**écart type sphéricité =**
Vitesse 50%	0.00037	0.00031	0.00036	0.00025	0.00036
Rapport entre la qualification manuelle et automatique	**3.3**	**9**	**7.1**	**9.3**	**7**

Conclusions:
En consultant ces résultats, nous constatons que la qualité de la qualification avec un accostage normal et à vitesse régulée est nettement préférable à une qualification manuelle car les écarts type peuvent être multipliés par 9.

Le résultat peut varier d'un rapport **de 3.3 à 9.3** entre les deux méthodes manuelle ou automatique avec accostage normal pour la qualification d'un palpeur simple en 5 points.
Conclusions:
A vitesse constante, les écarts type varient dans des rapports de 3 à 9 entre les deux méthodes.
Il faut, dans une machine à commande numérique, effectuer la qualification en assurant un accostage normal sur la sphère de référence.

Variation de la valeur du rayon moyen :
Les résultats donnés par le tableau n°3-6 montrent que le rayon dynamique est influencé par la méthode de qualification, mais que cela n'est le problème majeur.
C'est surtout la fidélité des résultats (tableau n°3-5) (écart type) qui dégrade la qualité de la mesure. (tableau n°3-5)

tableau n°3 6 Variation du rayon en automatique et en manuel

normal CNC	1.98563
quelconque	1.98435
écart	0.00128

Conclusions:
La variation du rayon d'un même palpeur diminue d'une valeur de 1,3 µm soit 2,6µm sur le diamètre par rapport à un accostage fait dans de bonnes conditions.

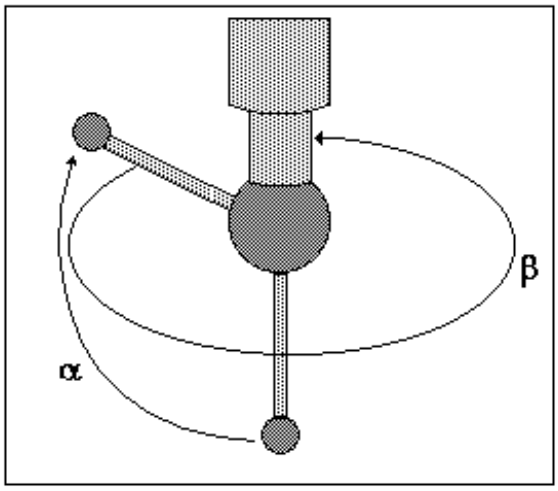
3-7-2- Conclusions générales sur le chapitre 3:

Je préconise une qualification en 5 points par rapport à une qualification en 9 points, pour un gain de temps et parce que le rayon moyen n'est pas véritablement perturbé par le défaut de triangulation de la tête de mesure tout en minimisant la vitesse au maximum (entre 1.6 et 2.4 m/mn).
Il est par contre très important de respecter au mieux la direction normale d'accostage, les écarts type étant dans ce cas minimisés(rapport entre 7 et 10).

3-8-1-Erreurs dues à l'orientation de la tête de mesure.

L'utilisation d'une tête orientable de type PH9 ou PH10 implique de connaître les erreurs de repositionnement suivant l'angle de rotation.
En effet, malgré les soins dans la finition et la précision des usinages de la part du constructeur, il est important de connaître la qualité et la fiabilité de ce type de palpeur orientable.
Deux rotations possibles: α et β

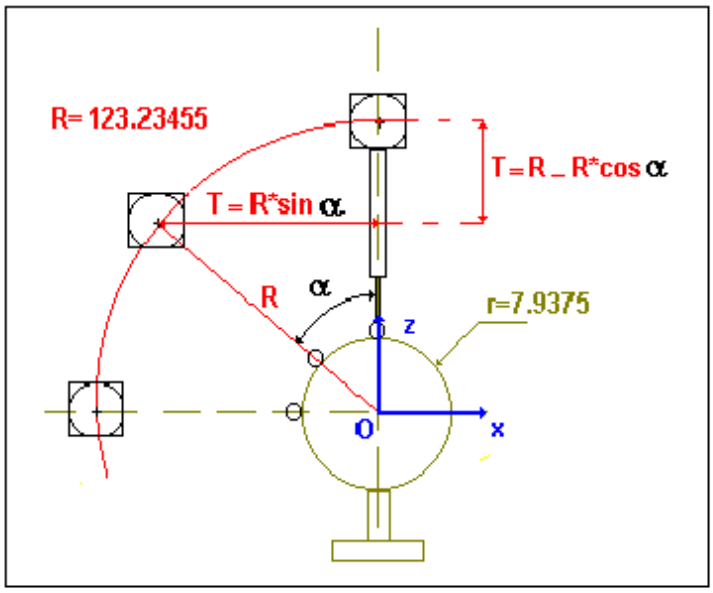
fig n°3 3 *Les deux rotations de la tête PH9*



3-8-1-1 Rotation de la tête de 0 à 105°pour l'angle α

Le programme que nous avons réalisé devait prendre en compte le recul de la machine par rapport à la rotation de l'angle α. (Recul du point P en P').
Les points d'accostage étant toujours dirigés suivant une direction normale à la matière, 1 point au pôle et 4 à l'équateur, les vecteurs d'accostage varient suivant l'angle d'orientation du palpeur.
De plus, les points de trajectoire restent définis dans un repère fixe situé sur le centre de la sphère de qualification dans sa position initiale soit α **= 0°**
Il est donc nécessaire de connaître en premier lieu la longueur du palpeur par rapport au point de rotation.
Cette opération a été réalisée par une série de qualification manuelle avec une rotation de α d'un pas de 7,5° du capteur.
Les résultats sont donnés par le tableau n° 3-7.
La figure n°3-4 montre la méthode de calcul du recul de la machine.

fig n°3 4 La rotation de l'angle α



Les photos n°3-1et n°3-2 montrent la tête orientable Renishaw avec les sphères de qualification.

Dans la photo n°3-1 le palpeur approche suivant un angle α = 45° et la photo n°3-2 montre l'ensemble sphères de qualification ainsi que la tête orientable et le palpeur complet.

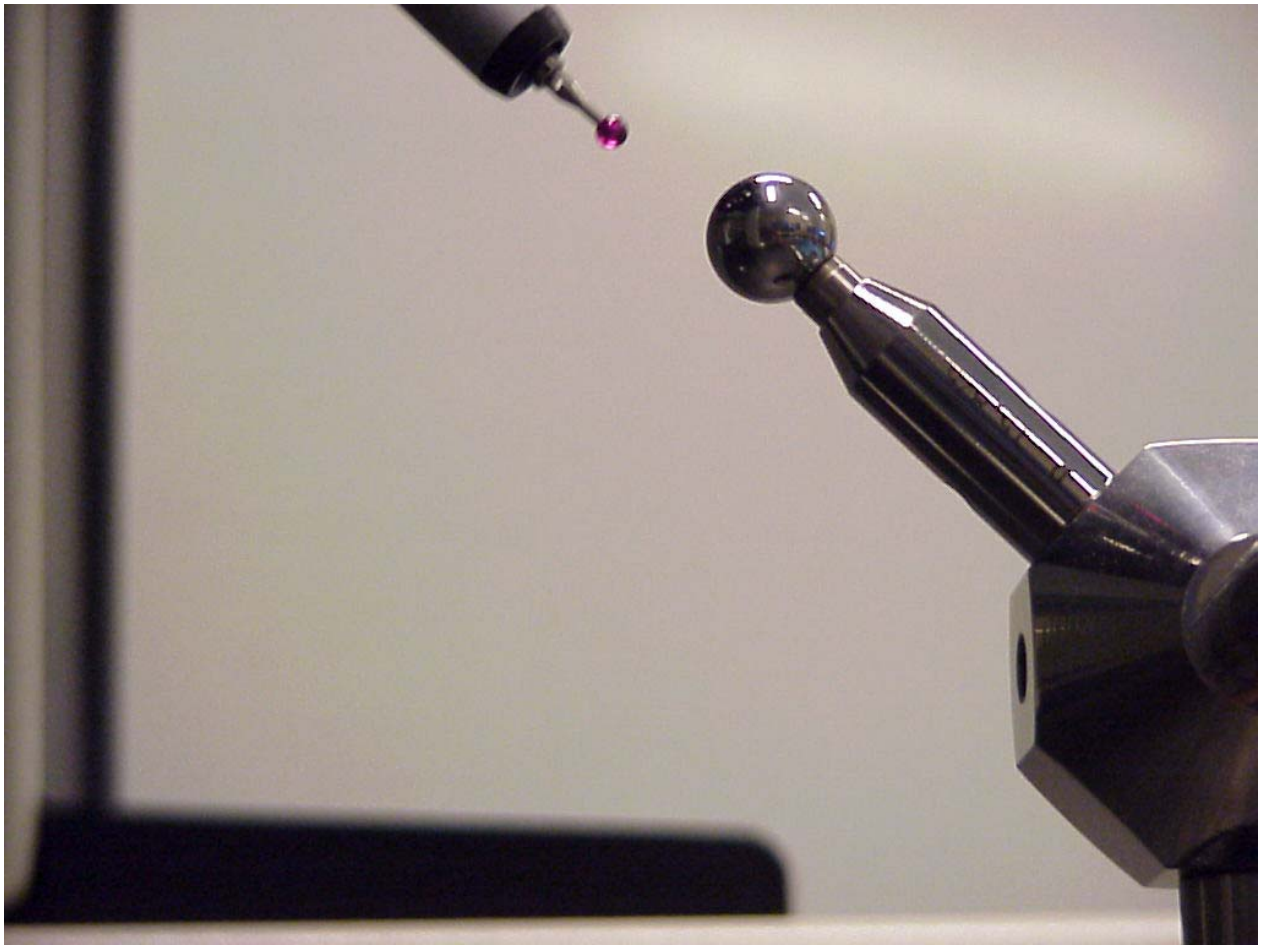


photo n°3 1 approche du capteur avec un angle α de 45 °

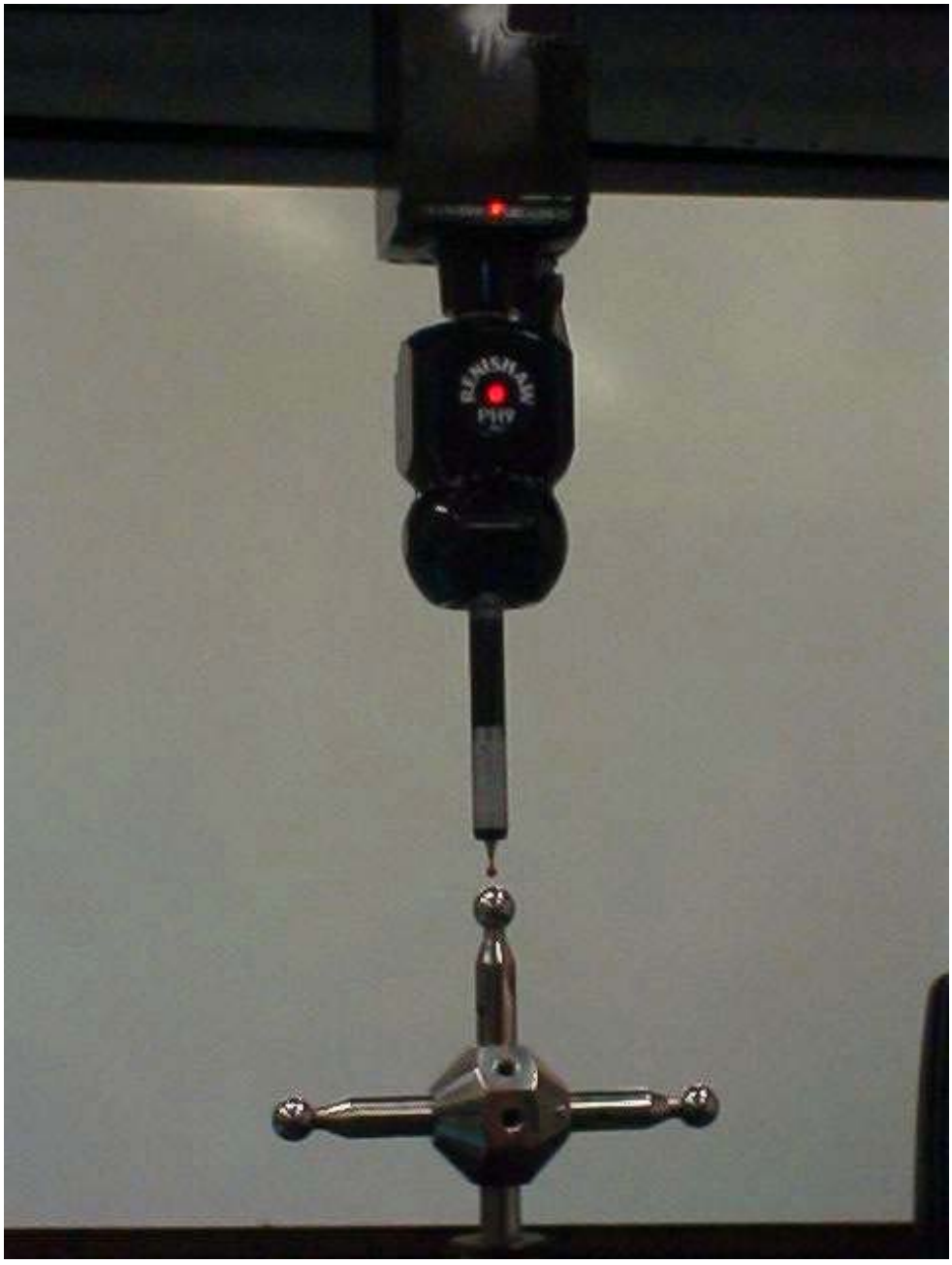


photo n°3 2 approche du capteur sur les sphères de mesures

Résultats de mesure :

Le tableau n°3-7 représente la mesure d'une même sphère en manuel dans les différentes positions de α de 0 à 105° avec un incrément de 7.5°.

tableau n°3 7 Mesure d'une sphère sur les positions α de 0 à 105°

Angles en degrés	**x=**	**y=**	**z=**
0	0.0005	0.0006	-0.0011
7.5	-16.1039	0.0013	-1.0938
15	-31.8541	0.0039	-4.2684
22.5	-47.1308	-0.0026	-9.5013
30	-61.5289	-0.0383	-16.6456
37.5	-74.9286	-0.0485	-25.6405
45	-86.9742	-0.0750	-36.2618
52.5	-97.6026	-0.0903	-48.4100
60	-106.5186	-0.1020	-61.8177
67.5	-113.5998	-0.1317	-76.3147
75	-118.7558	-0.1770	-91.6914
82.5	-121.8794	-0.2157	-107.4426
90	-122.8935	-0.2635	-123.5400
97.5	-121.7931	-0.2781	-139.6463
105	-118.5926	-0.3112	-155.3915

Le tableau n°3-7 permet de calculer le diamètre d'un cercle en 15 points, ses coordonnées en x et z par rapport au référentiel pris manuellement sur la sphère et son erreur de circularité.

J'ai utilisé pour cela le logiciel de la machine sur la position "simulation".
Cette position "simulation" permet de rentrer en manuel des coordonnées X, Y, Z afin d'obtenir un diamètre ainsi qu'un défaut de circularité.
La figure n°3-5 représente la page de Wtutor avec les coordonnées x, y, z du capteur avec
α =7.5°

fig n°3 5 longueur du palpeur

Le tableau n°3-8 donne les résultats de la longueur du palpeur. C'est cette longueur qui va nous permettre de déterminer les reculs T de la figure n°3-4

tableau n°3 8 longueur du palpeur

Longueur du palpeur	**x=**	**y=**	**erreur circularité**
123.2345	-123.2156	0.3727	0.2342

La longueur du palpeur est donc de : **123.2345 mm.**

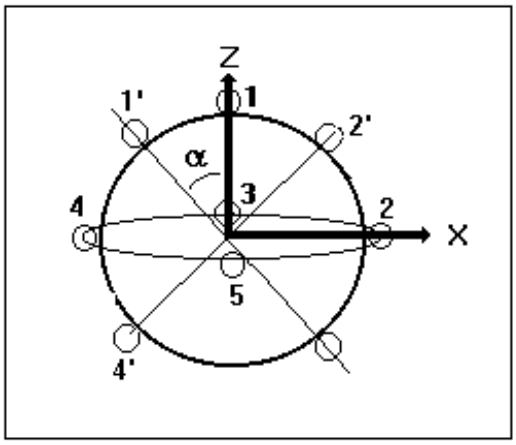
Le programme de qualification :

La mesure se fait en 5 points,1 au pôle et 4 à l'équateur, les accostages tiennent compte de la rotation de la tête et sont faits de manière à avoir toujours le pôle orienté suivant l'angle du palpeur. (fig n°3-6).

Le pôle situé en **1** tournera d'un angle α et passera en **1'.**

Les autres points **2** et **4** feront de même en **2'** et **4'**, les points **3** et **5** ne changent pas.

fig n°3 6 Qualification pour α = 0 à 90°



(voir programme annexe H)

Conditions de mesure :

Palpeur de longueur 10 mm.

Diamètre de la bille 4 mm.

Vitesse accostage 20%.

Variation de l'angle α de 0 à 90°

Résultats de mesure :

Le tableau n°3-9 donne les valeurs des différents paramètres x, y, z, rayon et défaut de sphéricité. Chaque paramètre est la moyenne de 30 qualifications dont les conditions de mesure sont précisées ci dessus.

Entre chaque qualification le palpeur revient dans la position α=0, β=0 afin de tester la répétabilité de position de l'angle α.

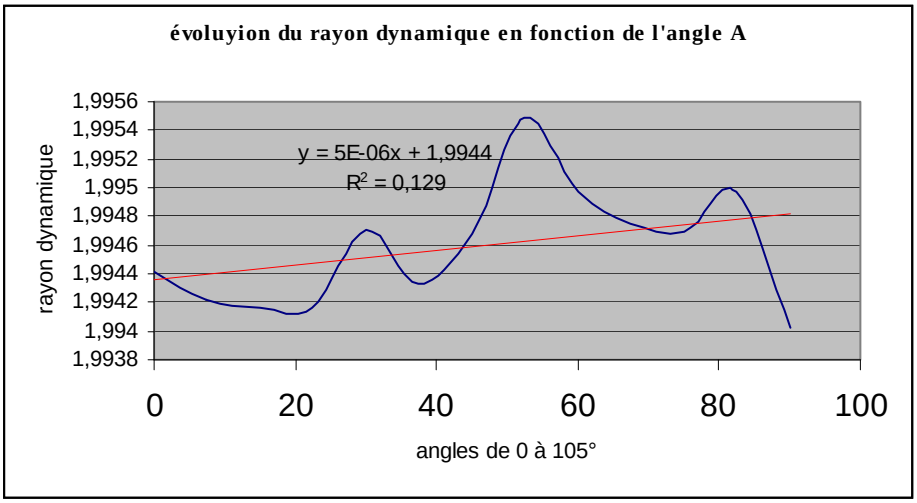
tableau n°3 9 Résultats des qualifications pour α =0° à 90°

angles	x=	y=	z=	rayon=	sphéricité=
0	0,001085	0,000115	0,002786	1,9944187	0,000817
7,5	-16,105093	0,0004176	-1,101269	1,994212	0,0007027
15	-31,85415	0,007969	-4,28704	1,994168	0,00045133
22,5	-47,123816	0,004865	-9,537618	1,994165	0,000383
30	-61,519067	-0,030277	-16,68935	1,994707	0,0002477
37,5	-74,91385	-0,039766	-25,6256	1,994327	0,0002817
45	-86,95399	-0,066986	-36,33166	1,9946733	0,0005037
52,5	-95,564622	-0,082209	-48,490099	1,995489	0,000282
60	-106,473488	-0,090953	-61,9002	1,994977	0,0002407
67,5	-113,54455	-0,11939	-76,4031	1,994752	0,0004917
75	-118,68867	-0,168	-91,38028	1,994689	0,0007907
82,5	-121,76882	-0,202975	-107,5482	1,994977	0,000552
90	-122,76747	-0,2469273	-123,6383	1,994023	0,00085753

La position des centres est légèrement différente du tableau n°3-7. Cela est du au palpage avec des points approximatifs en manuel et non sur des points calculés de manière à respecter un palpage normal.

Variation du rayon dynamique :

Le graphique n°3-4 donne la variation du rayon dynamique en fonction de l'angle α.



graphique n°3 4 variation du rayon dynamique en fonction de l'angle α

Le graphique n°3-4 fait apparaître une augmentation du rayon dynamique dans la position moyenne de l'angle α =37.5° à 60° et une dérive légère en fonction de l'angle.

Variation des écarts type :

Le tableau n°3-10 donne les variations des écarts type en fonction de l'angle α.

tableau n°3 10 variations des écarts type en fonction de l'angle α.

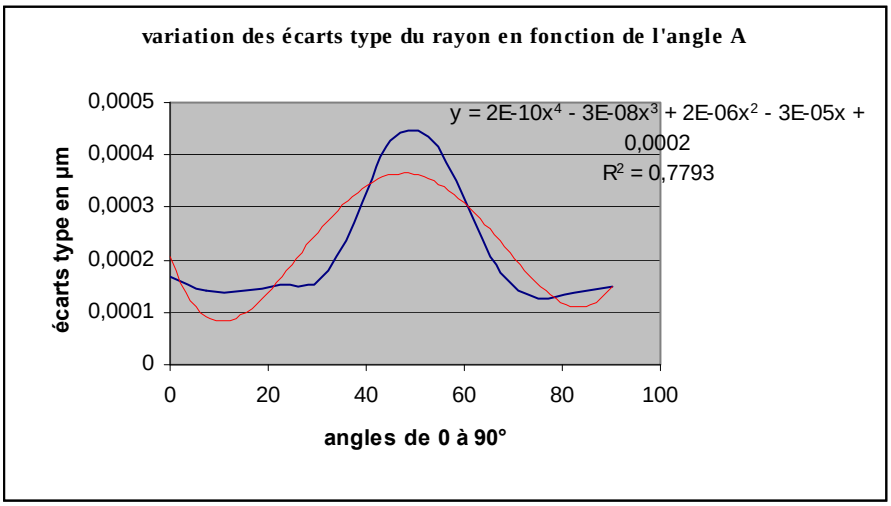
.

angles	écart type x	écart type-y	écart type z	écart type r	écart ty sph

0	0,000483	0,000345	0,00048	0,000168	0,00032
7,5	0,000321	0,000299	0,000239	0,0001426	0,000324
15	0,000174	0,000294	0,000292	0,00014	0,000217
22,5	0,000341	0,00023	0,000317	0,0001544	0,0002577
30	0,000267	**0,0005421**	0,0002631	0,0001606	0,0001949
37,5	**0,001145**	0,0003668	**0,0005525**	**0,0002705**	0,0002475
45	**0,0016789**	**0,000741**	**0,000408**	**0,0004279**	0,0002841
52,5	**0,00022482**	0,0002716	0,000319	**0,0004358**	0,0001743
60	**0,001663**	0,000477	0,000356	**0,0003173**	0,000154
67,5	0,000955	0,000231	0,000301	0,000175	0,000249
75	0,000336	0,000403	0,0002	0,0001254	0,000226
82,5	0,000419	0,000264	0,000329	0,0001357	0,0001972
90	0,0003223	0,0002265	0,0002337	0,0001493	0,0002566
moyenne	**0,00064077**	**0,00036085**	**0,00033002**	**0,00021558**	**0,00023864**
maximum	**0,0016789**	**0,000741**	**0,0005525**	**0,0004358**	**0,000324**
minimum	**0,000174**	**0,0002265**	**0,0002**	**0,0001254**	**0,000154**

Conclusions:

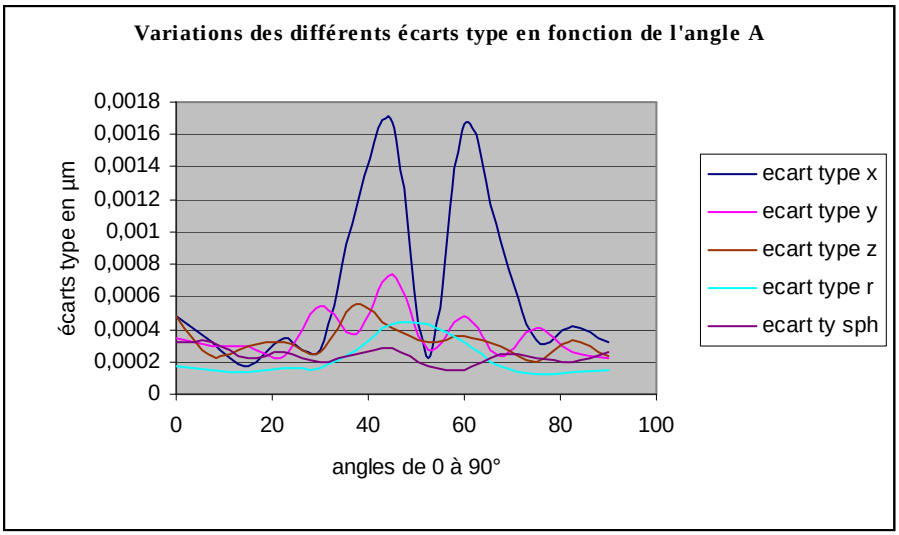
Les écarts type sont à peu près conformes aux valeurs obtenues avec α =0 sauf pour les angles entre 37.5° et 60° les écarts type sont sensiblement multipliés par 2.
On peut penser que pour les angles maximums la répétabilité est plus difficile à obtenir.
Nous en tiendrons compte dans le calcul de capabilité final.



Le graphique 3-5 donne les variations de l'écart type du rayon en fonction de l'angle.

graphique n°3 5 variations de l'écart type du rayon en fonction de l'angle α.

Le graphique n°3-6 montre l'ensemble des différents paramètres.
Il existe une certaine cohérence entre les différents paramètres.
Les variations sont plus importantes pour les angles de 37.5 à 60° que pour les angles plus faibles.



t

graphique n°3 6 variation des écarts type

Conclusions générales sur le chapitre 3-8

La rotation autour de l'angle α influe sur le rayon et sur les écarts type des différents paramètres.
La rotation pour des angles de 45 à 60° montre une forte augmentation des écarts type et une augmentation du rayon dynamique du capteur.
L'opérateur doit savoir que ces angles sont à éviter dans la mesure du possible.

3-8-1-2- Rotation de la tête de -180° à +180° pour l'angle β.

Afin de voir le comportement de la tête PH9 en rotation autour de l'axe Z, j'ai réalisé un programme (voir annexe H) comportant une série de 37 positions de -180° à + 180° avec un pas de 10°.
La longueur du palpeur (10 mm) a été choisie afin de minimiser les écarts.
Procédure de mesure :
- calibrage en manuel de la sphère de référence et mise à zéro du référentiel provisoire sur le centre de la sphère.
- passage en CNC et lancement des 30 mesures avec une rotation initiale α= 0° et β= 0°, puis

α =0°, β= Q et retour α =0°, β =0° entre chacune des 30 mesures, afin de faire apparaître la répétabilité en position de la tête de palpage.

Cycle:

probe (α =0., β =0.)
for Q=0 to 360 step 10
for I=0 to 30
msph (MEMORY[Q],30)
probe (α=0., β =0.)
end_for
end_for
(Voir programme annexe H)

etc..

Conditions de mesure :

Longueur du palpeur 10 mm, vitesse d'accostage 20%, 5 pts de qualification, diamètre bille 3 mm, diamètre du stylet 1.5mm, rotation autour de β de 10 en 10°.

Les résultats sont les suivants : (chaque paramètres x, y, z, rayon, sphéricité) est la moyenne de 30 mesures.

Le tableau 3-11 donnent les résultats des moyennes observées pour chaque angle exprimés en millimètres.

tableau n°3 11 Rotation de la tête de β=-180° à + 180°

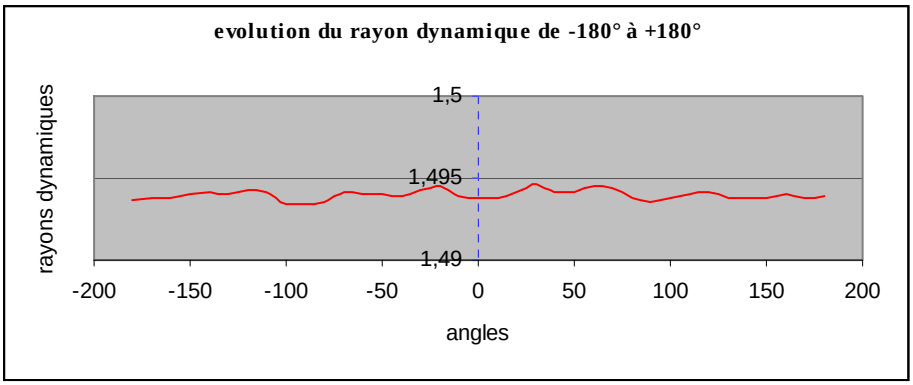
angles degrés	x=	y=	z=	rayon	sphéricité
-180	0,32719	-0,23457	0,00568	1,49361	0,00086
-170	0,33421	-0,21026	0,00558	1,4938	0,00235
-160	0,33395	-0,14808	0,00356	1,49373	0,00161
-150	0,32893	-0,12531	0,00161	1,49408	0,0002
-140	0,3219	-0,10535	0,00217	1,49411	0,00137
-130	0,31765	-0,09432	0,0034	1,49408	0,00105
-120	0,32141	-0,07657	0,00266	1,49432	0,00033
-110	0,30644	-0,0796	0,00293	1,4941	0,0012
-100	0,3062	-0,05107	0,00588	1,49336	0,00179
-90	0,30219	-0,01986	0,00721	1,49336	0,00154
-80	0,30192	-0,00733	0,00802	1,49348	0,00077
-70	0,25416	0,0559	0,00565	1,4941	0,00034
-60	0,23493	0,0854	0,00441	1,49407	0,00236
-50	0,19942	0,09689	0,00482	1,49398	0,00277
-40	0,12466	0,11262	0,00227	1,49393	0,00273
-30	0,08765	0,10637	0,00042	1,49431	0,00181
-20	0,05189	0,09087	0,00081	1,49447	0,00035
-10	0,0069	0,02686	0,0023	1,49395	0,00112
0	-0,00034	0,00135	0,0019	1,4938	0,0014

10	-0,02559	-0,04415	0,0026	1,49374	0,00142
20	-0,02408	-0,1019	0,00469	1,49409	0,00163
30	-0,01733	-0,11215	0,00524	1,49464	0,00025
40	-0,00482	-0,14091	0,00655	1,4942	0,00111
50	-0,00782	-0,15366	0,00528	1,49417	0,00066
60	0,00268	-0,15814	0,00406	1,49446	0,00093
70	0,00169	-0,17564	0,00397	1,49437	0,00074
80	0,00318	-0,20038	0,00209	1,49374	0,002
90	0,00769	-0,21913	0,00067	1,49358	0,00116
100	0,01569	-0,24138	0,00107	1,49372	0,00093
110	0,05697	-0,30515	0,00182	1,49398	0,00041
120	0,09197	-0,32209	0,00147	1,49415	0,00243
130	0,10898	-0,35158	0,0021	1,49376	0,0023
140	0,18474	-0,36332	0,00413	1,49384	0,0026
150	0,22374	-0,34505	0,00533	1,49379	0,00232
160	0,26622	-0,3386	0,00601	1,49398	0,00041
170	0,30393	-0,27384	0,00472	1,49375	0,00086
180	0,32594	-0,2363	0,00339	1,49385	0,00007
			Rayon	**1,49395811**	
			Ecart type	**0,00030126**	

3-8-2-3- Evolution du rayon du palpeur :

Conclusions:

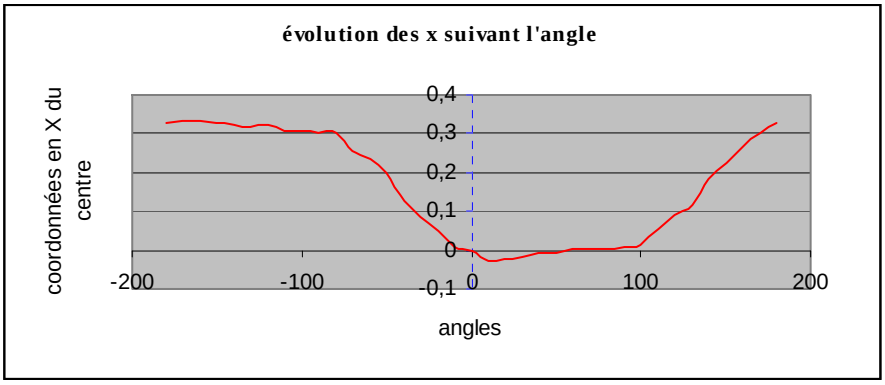
Après analyse du tableau n°3-11 et du graphique n°3-7, nous constatons que l'angle β de la tête ne provoque pas de variation significative du rayon du palpeur.
L'écart type du rayon est de l'ordre de 0.3 micromètres, ce qui confirme les valeurs du tableau n°2-1 qui donnait un écart type sur le rayon (0.00286 sur 30 mesures) avec une bille de 4mm.



graphique n°3 7 évolution du rayon dynamique de -180° à +180°

3-8-2-4- Evolution des x : (centre de la sphère de référence)

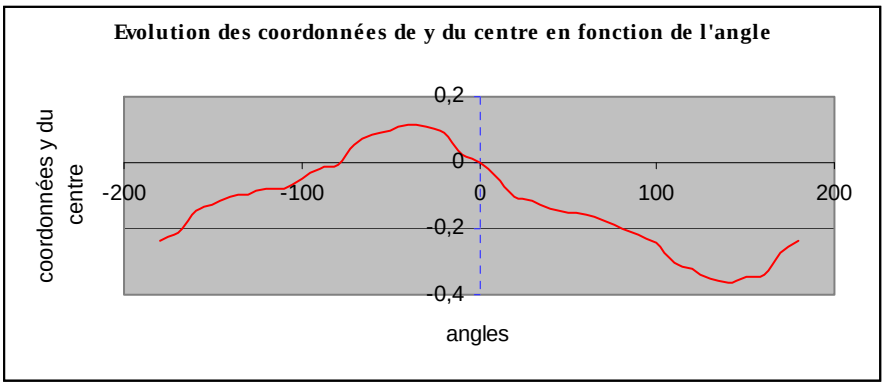
On constate une variation importante de la position du centre.
Pour les x, on constate que le centre de la sphère de référence est tributaire du faux rond de la tête de mesure. L'amplitude dépasse les 0.3mm.
Le calcul du centre de la sphère se faisant par rapport au référentiel déterminé avec la tête sur une position de $\beta = 0°$, les coordonnées du centre en X,Y,Z sont directement tributaires du faux rond de la tête de mesure.



graphique n°3 8 *Evolution de x suivant l'angle β*

3-8-2-5-Evolution des y : (centre de la sphère de référence)

On retrouve là aussi des écarts importants sur les y. L'amplitude atteint 0.4mm. (graphique n°3-9).
De plus on voit bien que la courbe est déphasée de $\pi/2$ par rapport à celle du graphique n°3-8.

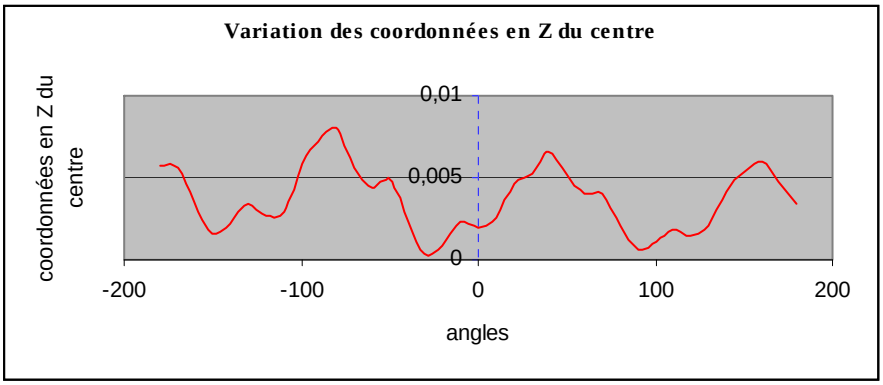


graphique n°3 9 *Evolution de y suivant l'angle β*

3-8-2-6-Evolution des z : (centre de la sphère de référence)

Le phénomène est beaucoup plus faible sur les z (0.008 mm), mais plus important que dans le cas général, c'est à dire même vitesse, même longueur, même diamètre, même nombre de points. (graphique 3-10)

On retrouve sur le graphe les maximums pour les angles correspondant aux 4 positions -90, -180, 90, et 180°.



graphique n°3 10 *Evolution de z suivant l'angle β*

Nota:
L'évolution de la sphéricité du capteur, dans ces cas, ne peut être que dépendante des résultats précédents. Elle n'a donc pas été véritablement analysée.

1ere conclusion :
La rotation d'une tête du type PH9, n'assure en aucun cas, un parfait battement axial et radial
Ce qui est du à la technologie de ce type de tête de mesure..
Mais cela n'a aucune importance car le phénomène étudié est la fidélité dans la remise en position de la tête suivant l'angle choisi.

Voyons la maintenant la fidélité dans le repositionnement

3-8-2-7- autre manière de poser le problème

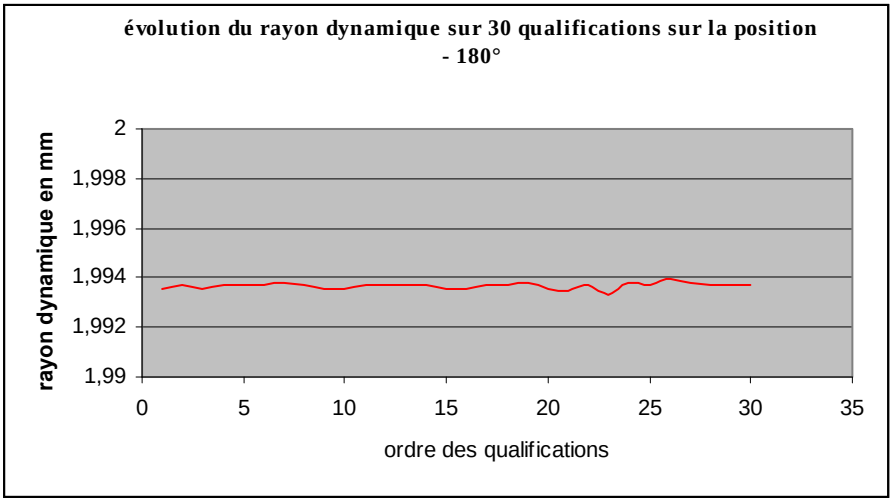
Il fallait donc voir le problème différemment.
Peut-on dire, par contre, que le repositionnement donne une garantie de fidélité quelle que soit la position de la tête autour de l'axe Z ? .
Procédure de mesure :

Mesure d'une sphère en qualification avec un pas de 30°, de -180° à +180°, soit 13 positions de mesures, chaque position étant mesurée 30 fois avec un retour à 0° entre chaque série de 30 mesures.
Conditions de mesure :
Longueur du palpeur 10 mm, vitesse d'accostage 20%, 5 pts de qualification, diamètre bille 4 mm.
Le tableau n°3-10 est un exemple de 30 qualifications sur la position -180°.
Pour chaque position nous avons collationné le même nombre de qualifications.

tableau n°3 12 Exemple de mesure à -180°.

n°mesures	x=	y=	z=	rayon	sphericité
1	0,25456	-0,25355	0,00464	1,99356	0,00059
2	0,2543	-0,25354	0,00446	1,99368	0,00088
3	0,25455	-0,25355	0,00412	1,99356	0,00061
4	0,25455	-0,2533	0,00446	1,99368	0,00035
5	0,2548	-0,25353	0,00396	1,99369	0,00085
6	0,2543	-0,25305	0,00396	1,99368	0,00084
7	0,2548	-0,2533	0,00383	1,99381	0,00059
8	0,2548	-0,25305	0,004	1,99368	0,00085
9	0,25455	-0,25305	0,00409	1,99355	0,00057
10	0,25455	-0,25305	0,00405	1,99356	0,00059
11	0,25455	-0,2533	0,00395	1,99369	0,00033
12	0,2548	-0,25305	0,00343	1,99369	0,00083
13	0,25454	-0,2533	0,00343	1,99369	0,00033
14	0,25454	-0,2533	0,00344	1,99369	0,00033
15	0,25454	-0,25306	0,00357	1,99355	0,00059
16	0,25455	-0,25306	0,00355	1,99356	0,00059
17	0,25454	-0,25281	0,00342	1,99368	0,00034
18	0,2548	-0,25305	0,00343	1,99369	0,00083
19	0,2543	-0,2528	0,00282	1,9938	0,00059
20	0,25454	-0,25305	0,00308	1,99356	0,00058
21	0,2548	-0,25305	0,00318	1,99344	0,00033
22	0,25455	-0,25279	0,00293	1,99368	0,00032
23	0,2543	-0,2533	0,0033	1,99331	0,0006
24	0,2543	-0,2528	0,00281	1,9938	0,00059
25	0,25405	-0,2528	0,00292	1,99367	0,00034
26	0,25455	-0,25279	0,00267	1,99393	0,00083
27	0,25429	-0,2528	0,0028	1,9938	0,00059
28	0,25481	-0,25254	0,00293	1,99368	0,00082
29	0,25455	-0,25279	0,00292	1,99368	0,00032
30	0,25455	-0,2528	0,00292	1,99368	0,00033
moyennes=	0,25454033	-0,25307367	0,00350233	1,99365733	0,000571
écarts type=	0,00019213	0,00027304	0,00056598	0,00011864	0,00020035

Conclusions:
Les écarts type partiels recoupent les valeurs données dans la première analyse sur 5 pts.
Le test de corrélation montre bien que ces valeurs obtenues sont indépendantes de l'ordre dans lequel elles sont prises.



graphique n°3 11 Evolution du rayon dynamique sur 30 qualifications pour β=-180°

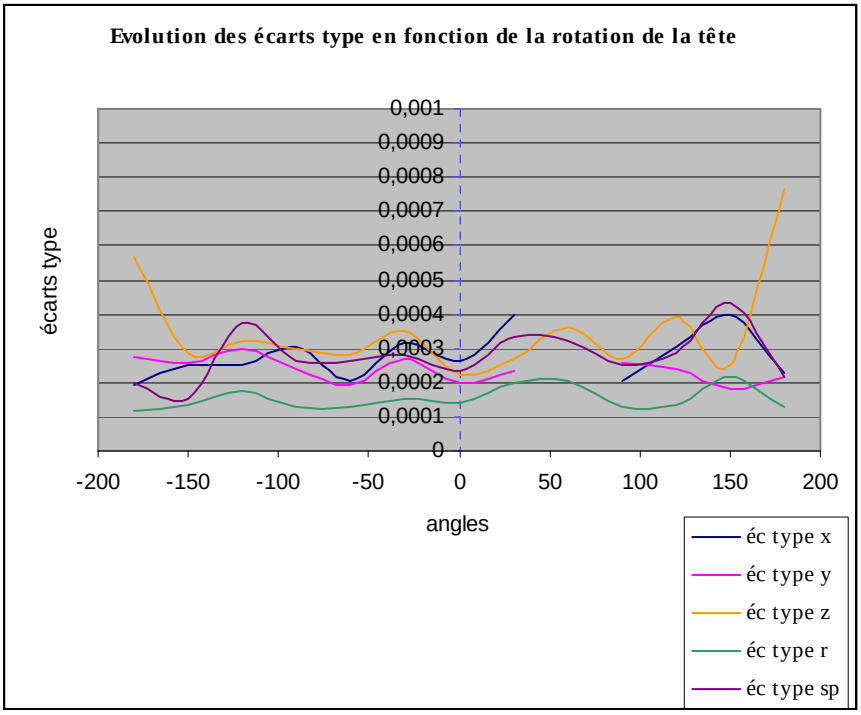
Le graphique 3-11 montre que les valeurs restent stables, et ne sont pas influencées par une tendance.
Voici maintenant le résultat global des 13 positions :

tableau n°3 13 (13 positions valeurs en mm)

angles B	éc type x	éc type y	éc type z	éc type r	éc type sp	rayon
-180	0,00019213	0,00027304	0,00056598	**0,00011864**	0,00020035	1.99357
-150	0,00025126	0,000255	0,00028683	**0,00013258**	0,00014978	1.99380
-120	0,00025355	0,00029921	0,00031915	**0,00017618**	0,0003753	1.99420
-90	0,00030435	0,00024183	0,00029938	**0,00013114**	0,00026208	1.99371
-60	0,00020545	0,00019511	0,00028023	**0,00012649**	0,00026324	1.99386
-30	0,00031312	0,00026822	0,0003504	**0,00014964**	0,00028091	1.99411
0	0,00026207	0,00019859	0,00022328	**0,00014243**	0,00023101	1.99383
30	0,00039655	0,00023354	0,00027145	**0,00019854**	0,0003361	1.99406
60	**0.00074128**	**0.00635302**	0,00036075	**0,00020471**	0,00032262	1.99397
90	0,00020438	0,00025798	0,00027018	**0,00012836**	0,00025108	1.99373
120	0,0003043	0,00024191	0,00039427	**0,00013662**	0,00028776	1.99385
150	0,00039577	0,0001804	0,00025329	**0,00021365**	0,00043038	1.99406
180	0,0002265	0,00021631	0,00076529	**0,00012705**	0,00021781	1.99367
Moyenne	0,00027579	0,00023843	0,00035696	**0,00015277**	0,00027757	1,993878
Maxi	0,00039655	0,00029921	0,00076529	**0,00021365**	0,00043038	1.99420
Mini	0,00020438	0,0001804	0,00022328	**0,00012649**	0,00014978	1.99357

Nota : Les variations de l'angle à 60° n'ont pas été prises en compte. (incident de mesure)

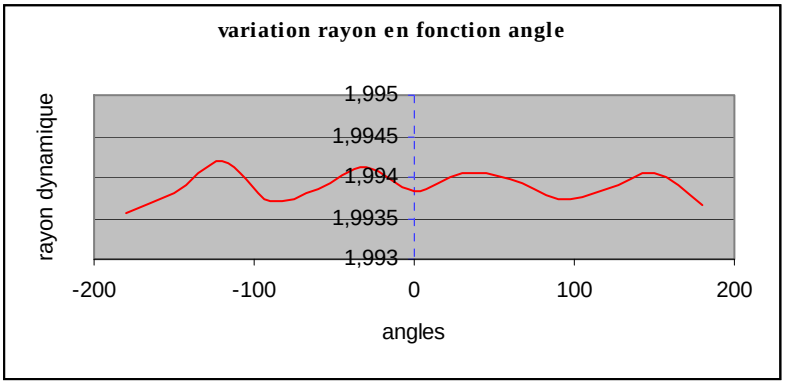
Le graphique n°3-11 montre que les écarts type sont peu sensibles à la position angulaire de la tête de mesure.
A part les positions limites de -180° et + 180°, et seulement pour les valeurs de z, les autres écarts type se situent dans des valeurs de 0.3 micromètres.



graphique n°3 12 variations des écarts type pour l'angle β

Etudions les variations du rayon dynamique :

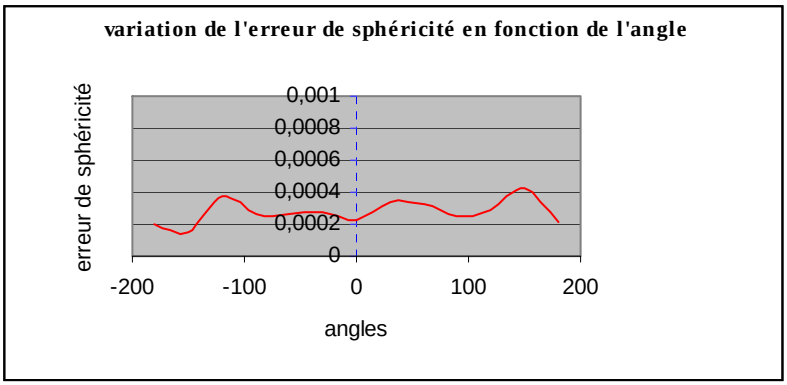
Le graphique n°3-13 montre le peu d'influence sur la valeur du rayon dynamique des angles **β .**



graphique n°3 13 variation du rayon dynamique.

Variation de la sphéricité :

On fait la même constatation sur le défaut de sphéricité. (graphique n°3-14)



graphique n°3 14 variation de la sphéricité :

Conclusions:
Toutes les valeurs sont comparables avec les résultats obtenus avec le même palpeur dans une position fixe (à 0°).
***On note toutefois des écarts plus importants pour les valeurs extrêmes* -180° et + 180° pour les valeurs de *Z*.**

Conclusions générales sur le chapitre 3-8-2

La valeur de l'angle β a une influence négligeable sur le comportement de la fidélité de la tête PH9.
L'écart type moyen sur le rayon (tableau n°3-13) confirme les valeurs constatées dans le paragraphe n°2-1.
Dans ce paragraphe, l'écart type était de 0.00028 mm et dans le tableau n°3-13 nous avons une valeur moyenne de 0.00015 avec un maxi de 0.00021 et un mini de 0.000126.

Le nombre de qualifications étant très important, (30 x 13), les valeurs obtenues tendent vers la population mère du chapitre (n°2-1 tableau n°2-3) qui donnait sur 100 mesures 0.00020 mm.
Les autres valeurs données par les graphiques n°3-11, n°3-12 et n°3-13 etn°3-14, confirment les conclusions précédentes.
Seules les valeurs de Z paraissent supérieures pour les valeurs extrêmes, mais peut-on les considérer comme significatives ?
Pour ma part, je considère ces valeurs comme spécifiques à la tête utilisée.

3-9-2-Variations des différents paramètres :

Dans les paragraphes précédents, l'étude a été réalisée avec des paramètres minimisés comme la longueur du palpeur de 10 mm et une vitesse lente égale à 20 %(1.6m / mn).
Dans ce chapitre, il me paraissait intéressant de se placer dans des conditions qui peuvent avoir une influence non négligeable sur le comportement de la tête de mesure.

3-9-2-1-Influence de la longueur du palpeur et de la vitesse d'accostage

Nous avons repris nos séries de 30 mesures en qualification avec 5 palpeurs de longueur différente (de 10 à 50 mm).
La procédure reste la même à savoir :
Accostage normal : 1 point au pôle et quatre à l'équateur.
Ces palpeurs sont des palpeurs standard en carbure avec la même bille saphir de 4 mm de diamètre.
Les variations de longueur ont été obtenues à l'aide de rallonge de manière à conserver toujours la même bille.

La vitesse d'accostage varie de 20 à 100% (8 m / mn maximum)en 5 paliers :
20%, 30%, 50%, 75%, 100% sur la même position du potentiomètre de réglage de la vitesse.

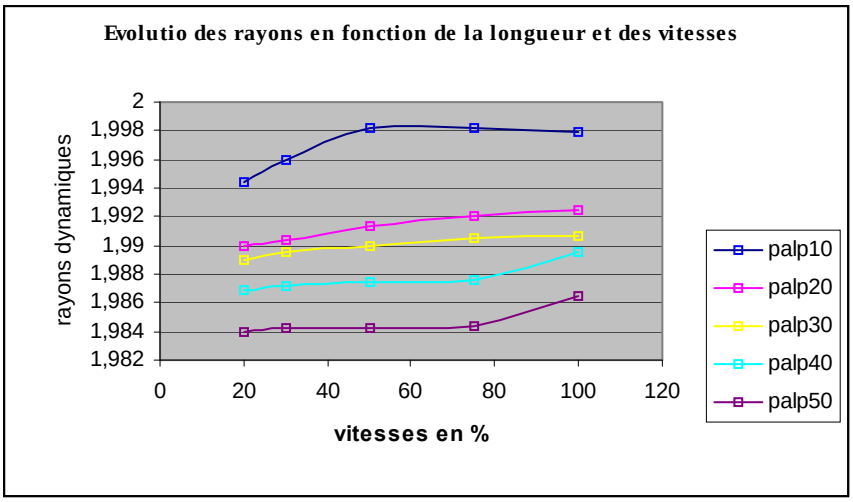
Voici les résultats :

tableau n°3 14 influence de la longueur du palpeur en fonction de la vitesse d'accostage

vitesse	palp10	palp20	palp30	palp40	palp50
20	1,9944	1,9899	1,989	1,9869	1,984
30	1,996	1,9904	1,9895	1,9872	1,9842
50	1,9982	1,9914	1,99	1,9874	1,9843
75	1,9982	1,9921	1,9905	1,9876	1,9844
100	1,9979	1,9924	1,9906	1,9896	1,9864

Conclusions partielles :
Le tableau n°3-14 fait apparaître une augmentation du rayon dynamique de la bille en fonction de la vitesse d'accostage et une diminution de ce même rayon dynamique en fonction de la longueur.
Le rayon dynamique du palpeur de longueur 10 mm à vitesse 20% (1.9944) est différent des valeurs du tableau n°2-1 (1.99592) les deux palpeurs utilisés à des périodes espacées sont du même type mais différents.

Ce qui donne le graphe suivant :



graphique n°3 15 Influence de la longueur du palpeur en fonction de la vitesse d'accostage.

.

On voit apparaître sur le graphique n°3-15 d'une part une diminution du rayon dynamique en fonction de la vitesse d'accostage, et d'autre part une variation du rayon dynamique importante directement liée à la longueur du palpeur :
La variation est de 1.9944mm pour un palpeur de 10 mm à 1.984mm pour un palpeur de 50 mm.

Conclusions partielles sur le tableau n°3-14 et sur le graphique 3-15

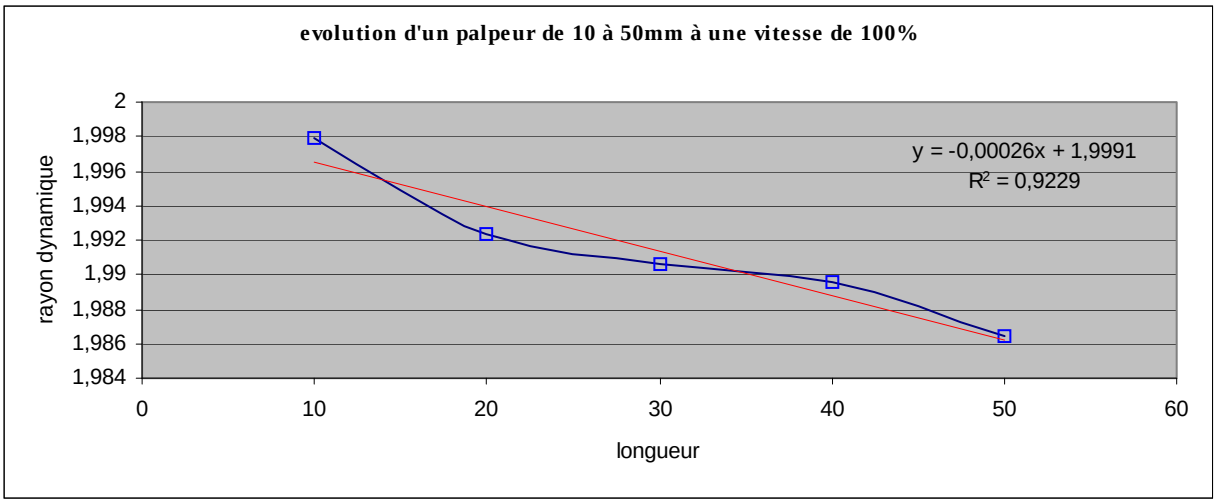
Certains logiciels demandent de rentrer manuellement la constante palpeur.
Nous constatons que les mesures précédentes montrent à quel point l'erreur de mesure peut être importante.

Influence de la longueur :
En observant les tableaux et les graphiques qui suivent (graphique n°3-16 et le tableau n° 3-15) nous constatons que l'évolution est bien linéaire et elle est due en grande partie au retard du déclenchement de la tête dynamique,
Le couple appliqué varie de 1 à 5, par contre le tarage du ressort reste constant.

tableau n°3 15 Influence de la longueur

longueur	vitesse 20	vitesse 30	vitesse 50	vitesse 75	vitesse 100
10	1,9944	1,996	1,9982	1,9982	1,9979
20	1,9899	1,9904	1,9914	1,9921	1,9924
30	1,989	1,9895	1,99	1,9905	1,9906
40	1,9869	1,9872	1,9874	1,9876	1,9896
50	1,984	1,9842	1,9843	1,9844	1,9864

Le graphique n°3-16 est un exemple de l'évolution pour des palpeurs de 10 à 50 mm de longueur à une vitesse constante de 100% :



graphique n°3 16 Evolution d'un palpeur de 10 à 50mm en fonction de la longueur

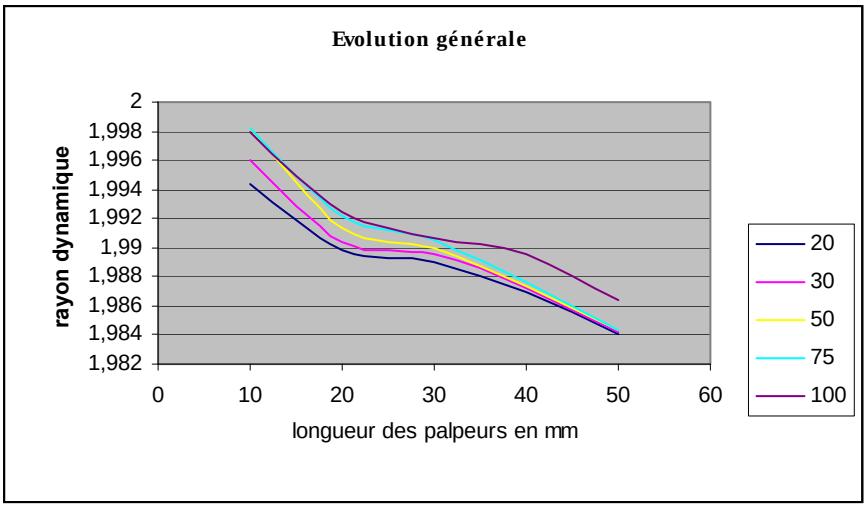
Les équations des pentes des autres palpeurs sont données dans le tableau n°3-16.

tableau n°3 16 Equations des pentes des autres palpeurs

Longueur du palpeur	**équation**	**Coefficient de détermination R^2**
10	Y=-0.00024x + 1.996	0.956
20	Y=-0.00027x + 1.9975	0.9397
30	Y=-0.00032x + 1.9998	0.9354
40	Y=-0.00032x + 2.0002	0.9589
50	Y=-0.00026x + 1.9991	0.9229

Nota: les courbes ont la même allure, les pentes varient entre -0.00024 et -0.00032 et les coefficients de détermination sont proches de 1:
Conclusions sur les équations en fonction des longueurs :
Les évolutions sont quasiment linéaires.
Les coefficients R^2 variant de 0.95 à 0.92, j'en conclurai que les calculs se feront par la suite avec des équations de la forme y = - ax + b
Ces résultats permettent de définir la valeur de la constante palpeur. (tableau n°3-16)

Voyons maintenant l'influence de la vitesse sur les rayons dynamiques.
Le graphique n°3-17 est le récapitulatif de l'évolution générale des rayons dynamiques en fonction de la vitesse.



graphique n°3 17 Evolution générale

3-9-2-2-choix définitif sur les équations de l'influence de la vitesse sur le rayon dynamique :

Il nous faut maintenant connaître le comportement de chaque palpeur à des vitesses différentes.
Reprenons le graphique 3-17
Equations pour les différents palpeurs :
Les deux modèles mathématiques possibles sont :
- Hypothèse 1- Equation logarithmique de la forme Y= Ln (x)+R
- Hypothèse 2- Equation du second ordre de la forme $Y= aX^2 +bX +R$

3-9-2-2-1-Hypothèse 1

Si nous choisissons l'hypothèse 1- les résultats sont les suivants :

tableau n°3 17 hypothèse 1

Longueur du palpeur	Equation en fonction de la vitesse en %	coefficient R^2
10 mm	y=0.0023Ln(x)+1.9881	0.8054
20 mm	y=0.0016Ln(x)+1.985	0.993
30 mm	y=0.0010Ln(x)+1.986	0.9875
40 mm	y=0.0013Ln(x)+1.9827	0.6556
50 mm	y=0.0011Ln(x)+1.9803	0.5641

D'après les premiers résultats, nous voyons que le modèle mathématique (de la forme y=0.0023 Ln (x) pour un palpeur de 10mm) ne se vérifie pas aussi clairement pour les vitesses importantes que pour les vitesses faibles. On ne pas dire que l'évolution soit totalement logarithmique.

3-9-2-2-2- Hypothèse 2

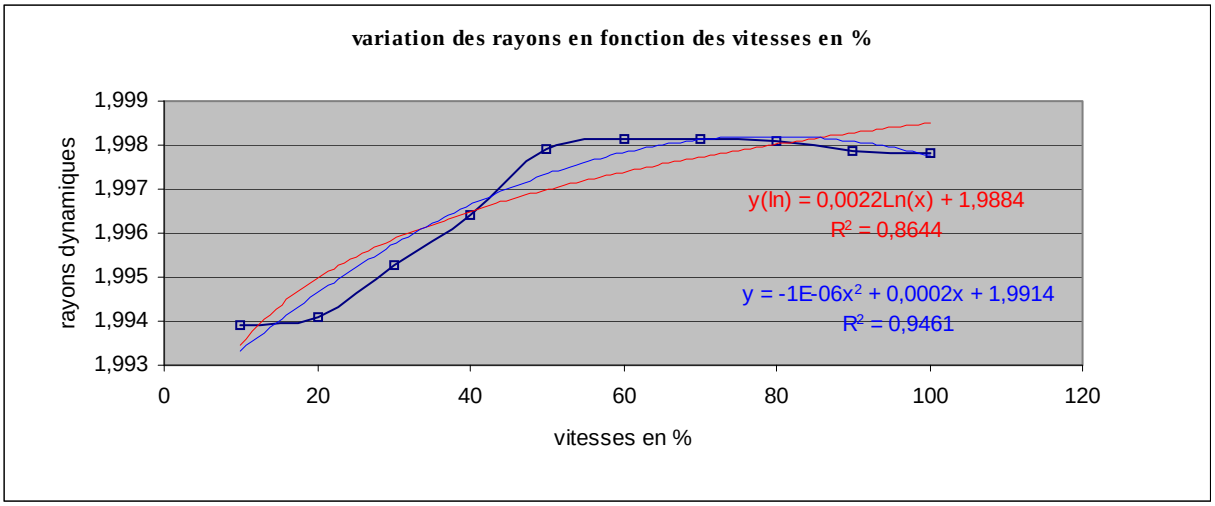
Si nous choisissons l'hypothèse 2- les résultats sont les suivants :

tableau n°3 18 Hypothèse 2

Longueur du palpeur	Equation en fonction de la vitesse en %	coefficient R^2
10 mm	$y=-1E-06x^2+0,0002x+1.991$	0.9653
20 mm	$y=-4E-07x^2+8E-05x+1.9885$	0.9992
30 mm	$y=-3E-07x^2+5E-05x+1.9881$	0.9954
40 mm	$y=-6E-07x^2-5E-05x+1.9876$	0.9374
50 mm	$y=-6E-07X^2-5E-05x+1.9849$	0.9253

Conclusions : les résultats du R^2 montre que le choix de l'hypothèse 2 est celui qui s'impose.

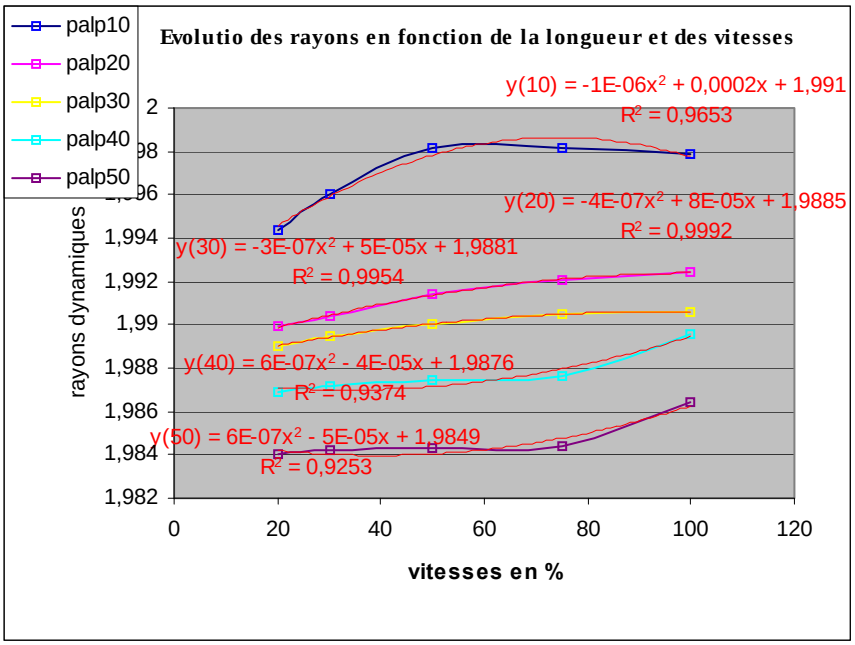
Le graphique n°3-18 confirme le choix que nous venons de faire pour le palpeur de 10mm.
Une évolution logarithmique donne un R^2=0.8054 alors que l'évolution du deuxième ordre donne R^2 =0.9653.
.



graphique n°3 18 - hypothèse 1 et 2 sur palpeur longueur 10 mm

Conclusion partielle :

C'est hypothèse 2 qui donne les meilleurs résultats :
En effet c'est l'hypothèse 2 ou la valeur de R^2 est la plus proche de 1.
Le graphique qui suit (n°3-19) permet de visualiser l'hypothèse 2 pour les différents palpeurs.



graphique n°3 19 Equations des palpeurs longueur 10 mm à 50 mm(valeur des rayons dynamiques)

Conclusions partielles :
L'hypothèse 2 a été choisie.
Les valeurs de R² sont dans chaque cas très proches de 1, ce qui signifie qu'il existe bien une corrélation entre les vitesses d'accostage et les rayons dynamiques des palpeurs.

3-9-2-2-3- Affinage des résultats :

Voyons maintenant en détail les résultats (tableau n°3-19) en augmentant les paliers de vitesses et en observant maintenant l'évolution des écarts type.
Nous avons repris les mesures avec un palpeur de 4 mm et une longueur constante de 10 mm en faisant varier la vitesse de 10 en 10 de 10 à 100%.

Voici les résultats :

tableau n°3 19 variation des écarts type en fonction de la vitesse

Vitesse d'accostage en %	écart type x=	Ecart type y=	écart type z=	écart type rayon =	écart type sphéricité	Rayon =
10	0,00028	0,00038	0,00035	0,00019	0,00033	1,99392
20	0,00019	0,00028	0,00024	0,00014	0,00021	1,99407

30	0,00054	0,00035	0,00037	0,00031	0,00027	1,99527
40	0,00042	0,00055	0,00041	0,00025	0,00041	1,99642
50	0,00028	0,00023	0,00025	0,00014	0,00016	1,99793
60	0,00028	0,000376	0,00027	0,00011	0,00021	1,99814
70	0,00017	0,00022	0,00025	0,00013	0,00016	1,99814
80	0,00025	0,00017	0,00024	0,00012	0,00011	1,99809
90	0,00018	0,00017	0,00012	0,00012	0,00013	1,99787
100	0,00022	0,00017	0,00041	0,00009	0,00024	1,99783

Le tableau n°3-19 représente les incertitudes type pour la position de la sphère de référence, l'incertitude type sur le diamètre et l'erreur de sphéricité d'un palpeur de longueur 10mm en fonction de la vitesse.
Les incertitudes sur la position du centre de la sphère sont le regroupement des incertitudes sur x, y, z.
On admettra que les incertitudes de x, y, z sont indépendantes .
Le calcul de l'incertitude type du centre de la sphère de référence est la composition quadratique des incertitudes partielles sur x, y, z.
En effet la formule générale de la composition des variances indépendantes entre elles est une somme arithmétique des variances partielles .
On aura donc :

$$Is^2 = V(x) + V(y) + V(z)$$

Et

$$Is_1 = \sqrt{s(x)^2 + s(y)^2 + s(z)^2}$$

Exemple:
Pour la vitesse 80%
Is1 position

$$Is_1 = \sqrt{0.00025^2 + 0.00017^2 + 0.00024^2} = 0.000386$$

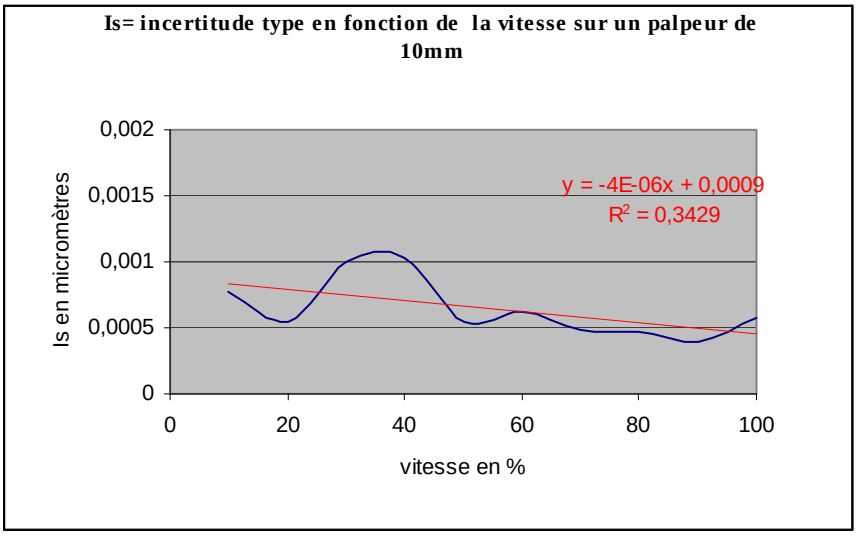
En groupant les valeurs Is1, Is2, Is3 de la même manière on obtient Is qui est l'incertitude globale sur un palpeur de 10 mm.(tableau n°3-20)

Une moyenne de **0.0006436** sera prise en compte car la pente n'est pas significative, et les valeurs entre 30 et 40% (graphique 3-20) ne permettent pas de tirer des conclusions autres qu'une variation aléatoire du phénomène.

tableau n°3 20 Valeurs des Is1, Is2, Is3, Is en fonction de la vitesse

Vitesse d'accostage	**Is1 position sphère référence**	**Is2 diamètre**	**Is3 erreur de sphéricité**	**Is = incertitude type**
10	0,0005876	0,00038	0,00033	0,00077369

20	0,0004148	0,00028	0,00021	0,00054277
30	0,0007423	0,00062	0,00027	0,00100414
40	0,0008044	0,0005	0,00041	0,00103204
50	0,0004402	0,00028	0,00016	0,00054571
60	0,000541	0,00022	0,00021	0,00062063
70	0,0003739	0,00026	0,00016	0,0004827
80	0,000386	0,00024	0,00011	0,00046765
90	0,0002751	0,00024	0,00013	0,00038756
100	0,0004954	0,00018	0,00024	0,00057914
Moyenne				**0.0006436**

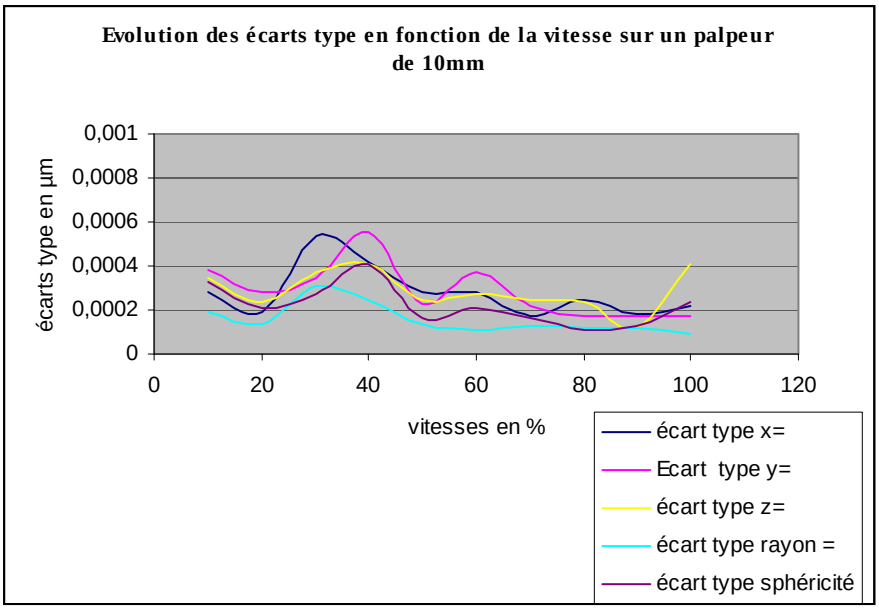


graphique n°3 20 Incertitude type sur un palpeur de 10 mm

Conclusions partielles :

Le graphique montre une quasi-stabilité de la valeur Is que nous allons arrondir à 0.0007 micromètres, valeur que nous utiliserons dans le tableau final du calcul de capabilité.

Si nous représentons les écarts type x, y, z, rayon et sphéricité le graphique n° 3-21montre bien une allure générale de tous les paramètres similaires au graphique partiel n°3-20.



graphique n°3 21 évolution des écarts type en fonction de la vitesse sur un palpeur de 10mm.

Conclusions sur l'influence de la vitesse sur l'incertitude type d'un palpeur de 10mm
L'incertitude type est dans ce cas :

Is = 0.0007micromètres

3-9-2-2-4-Equations générales pour les 5 palpeurs :

L'équation (1) est donnée par des vitesses de 20,30,50,75 et 100%
L'équation (2) est donnée par des vitesses de 10,20,30,40,50,60,70,80,90,100%

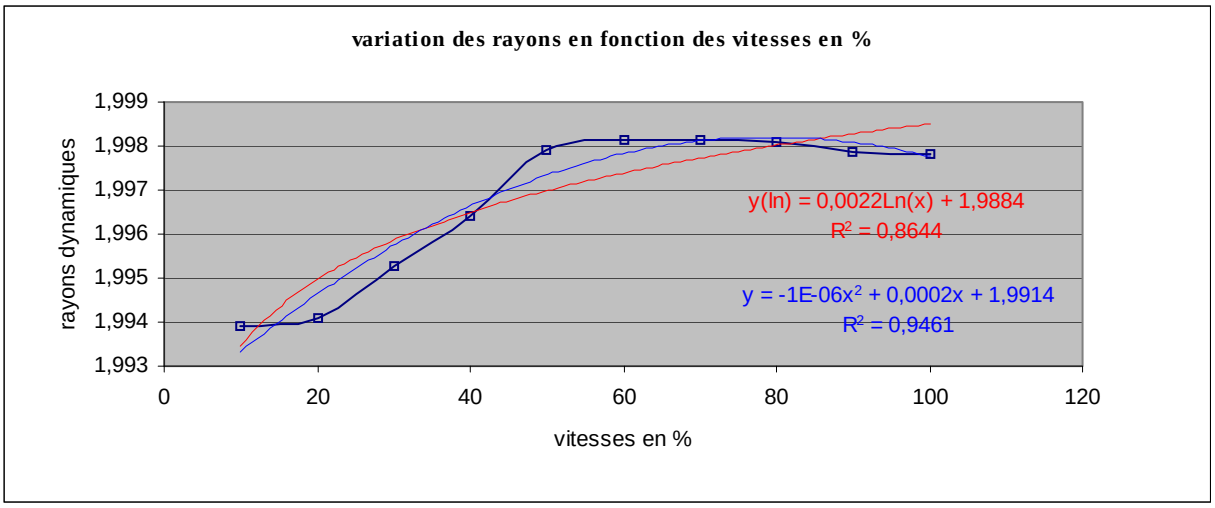
Equation avec 5 vitesses : $y=-1E-06x^2+0.0002x+1.991$. (1)
Equation avec 10 vitesses : $y=-1,446E-06x^2+0.0002x+1.9914$.(2)

On constate la cohérence de ces deux résultats pour un même palpeur de 10 mm.
Le tableau n°3-21 donne les 2 hypothèses sur 10 vitesses(2)avec les rayons recalculés et les écarts par rapport au modèle expérimental.

tableau n°3 21 écarts entre les valeurs expérimentales et les modèles mathématiques choisis

vitesse	rayon obtenu	hypothèse1	hypothèse2	écart hypothèse 1	écart hypothèse 2
10	1,99392	1,99346569	1,993256	0,000454313	0,000664
20	1,99407	1,99499061	1,994824	-0,00092061	-0,000754
30	1,99527	1,99588263	1,996104	-0,00061263	-0,000834
40	1,99642	1,99651553	1,997096	-9,5535E-05	-0,000676
50	1,99793	1,99700645	1,997800	0,000923549	0,000130

60	1,99814	1,99740756	1,998216	0,000732442	-0,000076
70	1,99814	1,99774669	1,998344	0,00039331	-0,000204
80	1,99809	1,99804046	1,998184	4,95414E-05	-0,000094
90	1,99787	1,99829958	1,997736	-0,00042958	0,000134
100	1,99783	1,99853137	1,997000	-0,00070137	0,000830
				moyenne	-8,8E-05



graphique n°3 22 Hypothèses 1 et 2

Le graphique n° 3-22 montre les courbes des hypothèses 1 et 2

Conclusions :

Les résultats étant proches des valeurs expérimentales, c'est l'hypothèse 2 qui va être utilisée pour les différents calculs sur l'influence de la longueur du palpeur par rapport aux vitesses.

Le tableau n°3-22 montre les différentes équations de l'influence de la vitesse sur les différents palpeurs de 10 à 50 mm.

tableau n°3 22 tableau récapitulatif des équations des rayons

Critères	palpeur 10	palpeur 20	palpeur 30	palpeur 40	palpeur 50
Equations rayons	y=-1,446E-06x²+0.0002x+1.9918.	y=-4E-07x²+8E-05x+1.9885	y=-3E-07x²+5E-05x+1.9881.	y=-6E-07x²-5E-05x+1.9876	y=-6E-07X²-5E-05x+1.9849

3-4-2-2-5-Influence de la vitesse sur les différents critères :

Sur un palpeur de 10 mm
Pour faire apparaître l'influence de la vitesse d'accostage (normal à la sphère de référence) reprenons la série des 30 qualifications avec des vitesses variant de 10 à 100 %. (tableau n°4-1-37)
Conditions de mesure :
Palpeur de longueur 10 mm, diamètre de la bille 4mm.
Le tableau 3-23 permet de tracer les variations des écarts type sur les différents critères étudiés, à savoir :
Position du centre de la sphère de référence pour la qualification en x, y, z (évolution des écarts type)
Rayon et sphéricité de la bille du palpeur (évolution des écarts type).
En se référant au tableau n°3-17, le tableau n°3.21 nous donne les équations globales des variations des écarts type en fonction de la vitesse pour un palpeur de 10 mm.

tableau n°3 23 variation des écarts type en fonction de la vitesse :

Palpeur 10mm/vitesse	Ecarts type x	Ecarts type y	Ecarts type z	Ecarts type rayon	Ecarts type sphéricité
	-2^{E}-06x+0.0004	-3^{E}-06x+0.0004	-9^{E}-07x+0.0003	-1^{E}-06x+0.0002	-2^{E}-06x+0.0003

Conclusions partielles :
Les pentes sont considérées comme peu significatives et on retrouve une constante de l'ordre de 0.3 µm,

Récapitulatif sur l'influence des paramètres pour un palpeur de 10mm avec vitesse 10%.
Erreur (Is1) sur la position de la sphère de référence en fonction de la vitesse (palpeur de 10mm

$$Is(x, y, z) = \sqrt{0.00038^2 + 0.00037^2 + 0.00029^2} = 0.00060$$

et vitesse 10%)

Is1=0.00060

Erreur (Is2) sur le diamètre du palpeur en fonction de la vitesse (palpeur de 10mm et vitesse 10) :

0.00019x2=0.00038

Erreur (Is3) sur la valeur de la sphéricité de la bille en fonction de la vitesse (palpeur de 10mm et vitesse 10%)
0.00033
Erreur totale Is avec k=2

$$Is = \sqrt{0.00060^2 + 0.00038^2 + 0.00033^2} = 0.00078$$

Et 2Is=±1.6 micromètres

3-4-2-2-6- Récapitulatif pour les différents palpeurs :

Afin de visualiser les différentes valeurs obtenues avec des vitesses différentes et des longueurs différentes, nous avons regroupé les résultats dans les tableaux n°3-24 à 3-28.

Tableaux d'évolution des écarts type suivant la longueur des palpeurs et les vitesses (valeurs en µm)

tableau n°3 24 tableau des écarts type pour un palpeur de 10 mm(valeurs en micromètres)

vitesse	longueur palpeur	diamètre	écart type x	écart type y	écart type z	écart type rayon	écart type sphéricité
20	10	4	0,417	0,431	0,423	0,335	0.322
30	10	4	0,313	0,388	0,23	0,212	0.302
50	10	4	0,258	0,263	0,35	0,125	0.225
75	10	4	0,169	0,063	0,242	0,083	0.167
100	10	4	0,194	0,194	0,356	0,1	0.23

tableau n°3 25 tableau des écarts type pour un palpeur de 20 mm

vitesse	long palpeur	diamètre	écart type x	écart type y	écart type z	écart type rayon	écart type sphéricité
20	20	4	0,334	0,228	0,493	0,153	0.276
30	20	4	0,319	0,364	0,244	0,167	0.39
50	20	4	0,282	0,278	0,381	0,155	0.291
75	20	4	0,35	0,242	0,333	0,235	0.348
100	20	4	0,382	0,458	0,258	0,243	0.449

tableau n°3 26 tableau des écarts type pour un palpeur de 30 mm

vitesse	longueur palpeur	diamètre	écart type x	écart type y	écart type z	écart type rayon	écart type sphéricité
20	30	4	0,17	0,23	0,461	0,298	0.322
30	30	4	0,344	0,189	0,776	0,155	0.218
50	30	4	0,375	0,291	0,24	0,175	0.3
75	30	4	0,352	0,316	0,432	0,162	0.373
100	30	4	0,293	0,494	0,337	0,324	0.453

tableau n°3 27 tableau des écarts type pour un palpeur de 40 mm

vitesse	long palpeur	diamètre	écart type x	écart type y	écart type z	écart type rayon	écart type sphéricité

20	40	4	0,485	0,226	0,631	0,258	0.316
30	40	4	0,428	0,344	0,665	0,185	0.337
50	40	4	0,663	0,57	0,454	0,405	0.665
75	40	4	0,198	0,265	0,307	0,145	0.351
100	40	4	0,753	0,193	0,446	0,403	0.788

tableau n°3 28 tableau des écarts type pour un palpeur de 50 mm

vitesse	longueur palpeur	diamètre	écart type x	écart type y	écart type z	écart type rayon	écart type sphéricité
20	50	4	0,326	0,489	0,174	0,174	0.509
30	50	4	0,324	0,268	0,399	0,211	0.334
50	50	4	0,453	0,647	0,824	0,434	0.783
75	50	4	0,535	0,911	0,596	0,593	1.27
100	50	4	0,833	0,972	0,959	0,76	0.771

Le tableau n°3-29 donne les valeurs types moyens pour chaque palpeur
C'est l'objet du tableau n° 3-29

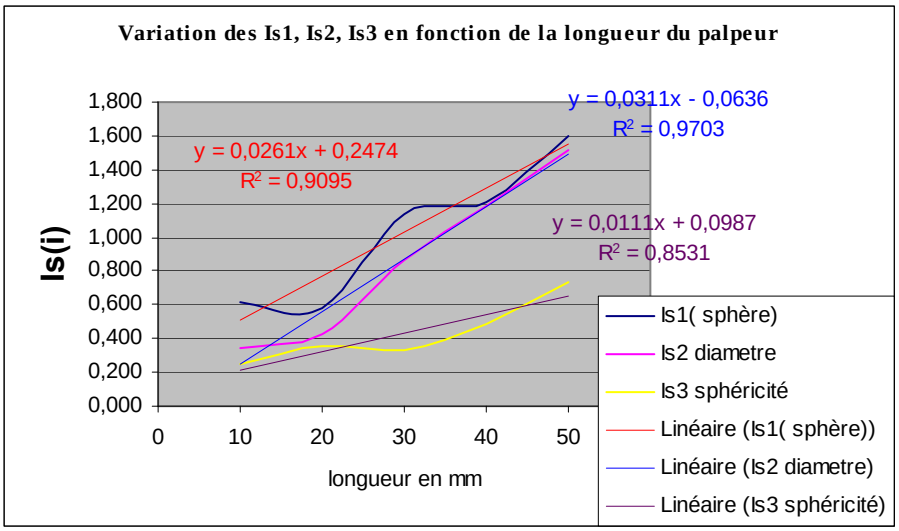
tableau n°3 29 tableau des écarts type moyens pour les différents palpeurs

Longueur palpeurs	écarts type moyen x	écarts type moyen y	écarts type moyen z	écarts type moyen rayon	écarts type moyen sphéricité
10	0,2702	0,2678	0,3202	0,171	0,2492
20	0,3334	0,314	0,3418	0,1906	0,3508
30	0,3068	0,304	0,4492	0,2228	0,3332
40	0,5054	0,3196	0,5006	0,2792	0,4914
50	0,4942	0,6574	0,5904	0,4344	0,7338

En regroupant les écarts types moyens de x, y ,z , rayon et sphéricité sous la forme Is1,Is2,Is3 (tableau n°3-28),on obtient les valeurs de Is en fonction de la longueur .

tableau n°3 30 valeurs de Is1,Is2,Is3

Longueurs	Is1(centre de la sphère)	Is2 diamètre	Is3 sphéricité
10	0,613	0,348	0,2492
20	0,580	0,422	0,3508
30	1,141	0,868	0,3332
40	1,213	1,186	0,4914
50	1,599	1,52	0,7338



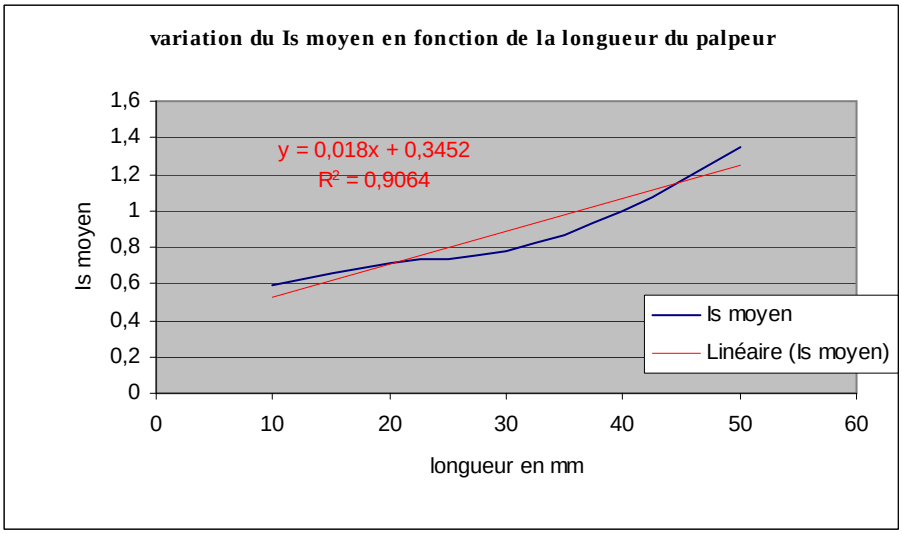
graphique n°3 23 Variation des Is1,Is2,Is3 en fonction de la longueur

Conclusions partielles :
L'évolution des différents paramètres est quasiment linéaire.
Nous avons la plus grande incertitude sur le centre de la sphère de référence et dans l'ordre décroissant le diamètre de la bille de palpage et l'erreur de sphéricité du palpeur

tableau n°3 31 Is moyen

Longueur	Is moyen
10	0,5252
20	0,7025
30	0.8852
40	1.0652
50	1,2452

Le tableau n°3-31 nous permet de tracer le graphique n°3-24 qui donne les évolutions des écarts type moyen pour chaque palpeur.



graphique n°3 24 Equations de Is moyen en fonction de la longueur.

Equations générales pour les 5 palpeurs

tableau n°3 32 Equations de Is1, Is2, Is3, Is en fonction de la longueur

Paramètres	Is1 (centre de la sphère)	Is2 (rayon)	Is3 (sphéricité)	Is
Equations Valeurs en µm	0.0261x+0.2474	0.031x+0.0636	0.0111x+0.0987	0.018x+0.3452

3-4-2-2-7-Conclusions partielles sur le chapitre 3-4-2 :

Les différents constructeurs ne font jamais apparaître dans leurs estimations d'incertitude de leur machine, les différentes influences liées à la longueur du palpeur et la vitesse d'accostage utilisées sur la machine.
Ils se contentent de donner une formule qui est beaucoup trop générale.

Donner une incertitude de la forme A + bL supposerait de préciser les conditions des différents paramètres utilisés.
Ce n'est absolument pas le cas actuellement.
Les résultats de ce paragraphe permettront d'avoir une information plus proche de la réalité sur le comportement des palpeurs utilisés.

3-9-2-2-10-Récapitulatif sur l'influence des paramètres longueur et vitesses.

Le tableau n°3-33 donne l'ensemble des variations du rayon dynamique en fonction de la vitesse.

tableau n°3 33 Equations en fonction de la longueur

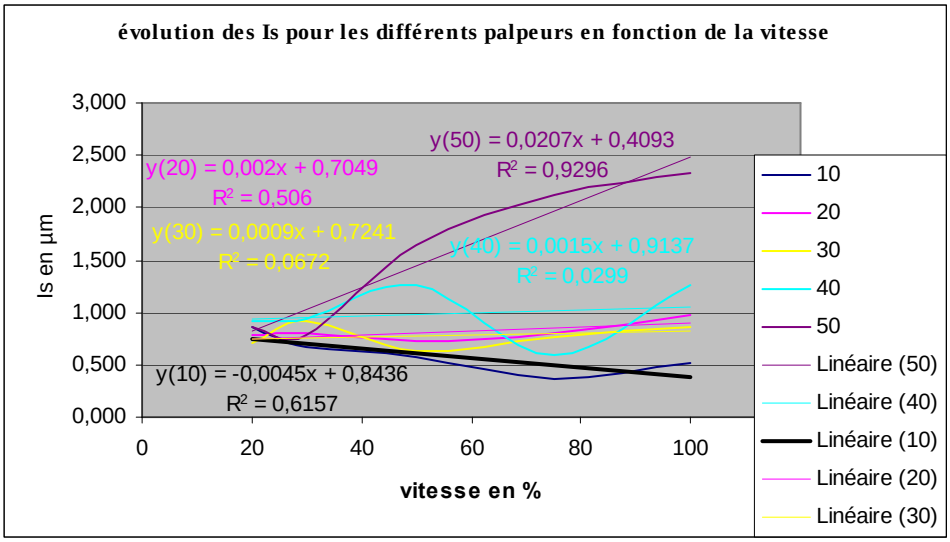
Longueur du palpeur	équation	Coefficient de détermination R^2
10	Y=-0.00024x + 1.996	0.956
20	Y=-0.00027x + 1.9975	0.9397
30	Y=-0.00032x + 1.9998	0.9354
40	Y=-0.00032x + 2.0002	0.9589
50	Y=-0.00026x + 1.9991	0.9229

Le tableau n°3-34 représente les incertitudes type (Is) pour les différents palpeurs en palpage automatique avec accostage normal et en fonction de la vitesse.

tableau n°3 34 Is en fonction de la vitesse

	Longueur10	20	30	40	50
Vitesse 20%	0,869	0,778	0,698	0,922	0,869
30	0,661	0,809	0,910	0,944	0,791
50	0,570	0,721	0,635	1,256	1,634
75	0,355	0,803	0,759	0,590	2,119
100	0,515	0,971	0,868	1,260	2,337

Le graphique n°3-25 montre les différentes équations de l'influence de la vitesse sur les palpeurs de 10 à 50 mm.



graphique n°3 25.Evolution de Is pour les différents palpeurs

tableau n°3 35 Récapitulatif des équations des différents palpeurs en fonction des vitesses d'accostage (valeurs de Is).

Longueur des palpeurs	**10mm**	**20mm**	**30mm**	**40mm**	**50mm**
Equations en fonction de la vitesse 10-100%	-0.0045x+0.8436	0.002x+0.7049	0.0009x+0.7241	0.0015x+0.9137	0.0207x+0.4093

tableau final

tableau n°3 36 Rayon du palpeur avec son incertitude globale à ± 2 Is.

Application:

longueur	rayon	Incertitude ± 2 Is (en µm)sur le diamètre de la bille. (10%)	Incertitude ± 2 Is (en µm)sur le diamètre de la bille. (100%)
10	1,9984	1,5972	0.7872
20	1,9921	1,4898	0.9049
30	1,9892	1,5022	1.6282
40	1,9874	1.9474	2.1074
50	1,9861	2.8886	4.9586 (1)

tableau n°3 37 Incertitude à ± 2 Is en fonction de la longueur et de la vitesse

longueur	Vitesse 20 %	30	50	75	100
10	1,5072	1,4172	1,2372	1,0122	0,7872
20	1,092	1,132	1,212	1,312	1,412
30	1,4842	1,5022	1,5382	1,5832	1,6282
40	1,8874	1,9174	1,9774	2,0524	2,1274
50	1,6466	2,0606	2,8886	3,9236	4,9586 (1)

Exemple: pour un palpeur de 50mm avec une vitesse de 100 %

Is= 2.4793 µm

2Is= ± 4.96 µm (1)

Ces valeurs sont peu compatibles avec des intervalles de tolérances de qualité H7 voire de qualité H8.

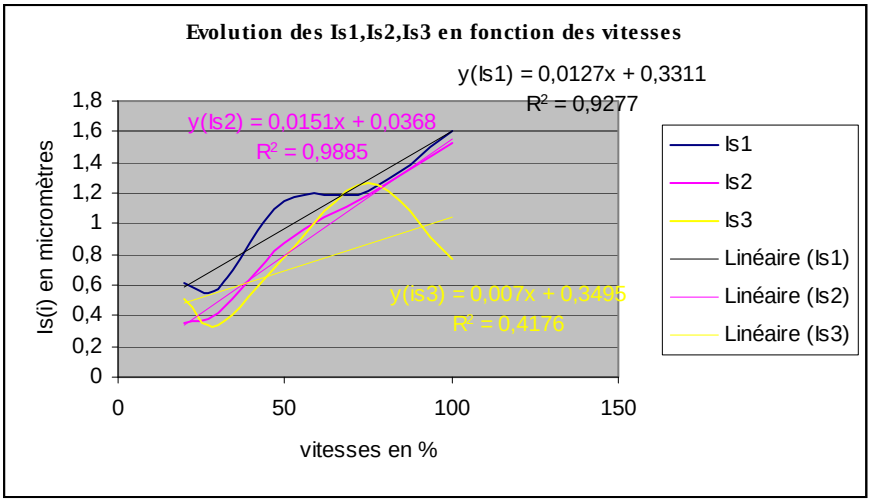
Comment minimiser ces incertitudes:

L'incertitude sur la position de la sphère de référence peut ne pas être prise en compte si la référence machine n'est pas située sur la sphère de référence.
Dans les machines CNC cela n'est pas toujours nécessaire et dans ce cas le terme Is1 n'est pas pris en compte.

tableau n°3 38 Tableau récapitulatif des écarts type en fonction de la vitesse

Vitesses	écart type x	écart type y	écart type z	Is1	Is2	Is3	Is
20	0,326	0,489	0,174	0,61292169	0,348	0,509	0,869
30	0,324	0,268	0,399	0,57965593	0,422	0,334	0,791
50	0,453	0,647	0,824	1,14140002	0,868	0,783	1,634
75	0,535	0,911	0,596	1,21299711	1,186	1,27	2,119
100	0,833	0,972	0,959	1,59948554	1,52	0,771	2,337

Le graphique n° 3-26 donné par le tableau n°3-36 permet de dissocier les différents paramètres Is1, Is2, Is3.



graphique n°3 26 Evolution de Is1,Is2,Is3 en fonction de la vitesse

Le tableau n°3-39 récapitule les équations de Is1, Is2, Is3 en intégrant la longueur et la vitesse.

tableau n°3 39 Equations de Is1,is2,Is3

Vitesses et longueur	Is1 (centre de la sphère	Is2 (rayon)	Is3 (sphèricité)
équations	0.0127x+0.3311	0.0151x+0.0368	Y=0.007x+0.3495

Erreur (Is1) sur la position de la sphère de référence en fonction de la vitesse et de la longueur du palpeur :

0.0127 x + 0.3311 = 1.6011* (cette valeur n'est pas prise en compte pour une machine CNC)

Erreur (Is2) sur le rayon de 2mm du palpeur en fonction de la vitesse et la longueur du palpeur :

0.0151x + 0.0368 = 1.5468 * sur le rayon et 3.0936 sur le diamètre

Erreur (Is3) sur la valeur de la sphéricité de la bille en fonction de la vitesse et de la longueur du palpeur :

0.007x + 0.3495 = 1.0495 *

*valeurs en micromètres.

exemple de calcul d'incertitude pour un palpeur de longueur 50mm à la vitesse maximum de 100 % :

$$Is = \sqrt{Is2^2 + Is3^2} = \sqrt{0.00155^2 + 0.00105^2} = 0.00187$$

ce qui donne avec k=2 **± 3.74 µm (2)**
au lieu de ± 4.96 µm du paragraphe 4-2-4-5-2

Conclusions partielles sur le chapitre 3-2-2

On doit donc intégrer les facteurs longueurs et vitesses dans l'opération qualification pour les calculs d'incertitude.
Dans ce calcul d'incertitude la prise en compte des incertitudes de type A doit être faite en fonction des paramètres utilisés.

Tableau et abaque récapitulatif *:*

En fonction des paramètres de longueur et de vitesses du capteur, nous pouvons établir un abaque général qui permettra à chaque opérateur de choisir les paramètres les plus adaptés en fonction de l'aspect technologique et économique du besoin.
Le tableau n°3-40 permet de calculer directement l'incertitude globale de la qualification palpeur suivant les vitesses employées et la longueur du palpeur avec une probabilité de U=0.95. (k=2)
Nota:
La pente négative pour un palpeur de 10mm, constatée dans le graphe n°4-2-32, a été corrigée suivant une moyenne des résultats.

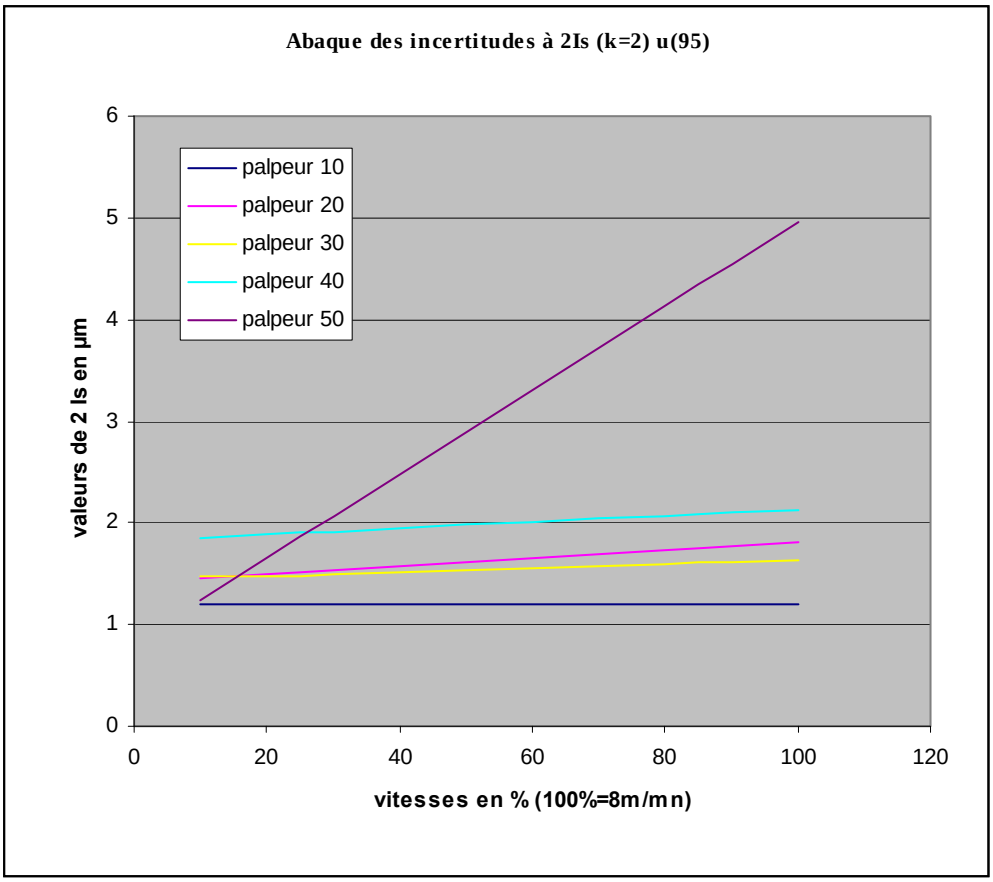
tableau n°3 40 valeurs calculées

vitesses	Is1+Is2+Is3 palpeur 10	Is1+Is2+Is3 palpeur 20	Is1+Is2+Is3 palpeur 30	Is1+Is2+Is3 palpeur 40	Is1+Is2+Is3 palpeur 50
10	1,2000	1,4498	1,4662	1,8574	1,2326
20	1,2000	1,4898	1,4842	1,8874	1,6466
30	1,2000	1,5298	1,5022	1,9174	2,0606
40	1,2000	1,5698	1,5202	1,9474	2,4746
50	1,2000	1,6098	1,5382	1,9774	2,8886
60	1,2000	1,6498	1,5562	2,0074	3,3026
70	1,2000	1,6898	1,5742	2,0374	3,7166
80	1,2000	1,7298	1,5922	2,0674	4,1306
90	1,2000	1,7698	1,6102	2,0974	4,5446
100	1,2000	1,8098	1,6282	2,1274	4,9586

L'abaque graphique n°3-27 donne les calculs des incertitudes avec k=2 suivant les paramètres utilisés.
Ce graphique montre l'évolution importante des incertitudes avec des palpeurs supérieurs à 30mm et avec des vitesses importantes.

3-10-1-Abaque général permettant de donner une incertitude globale suivant la longueur et la vitesse des palpeurs en qualification.

Les valeurs indiquées montrent à quel point l'utilisation de palpeurs de grandes longueurs à des vitesses importantes peuvent dégrader la qualité des mesures.



graphique n°3 27 Abaque des incertitudes à +/- 2 Is

3-10-1-1-Conclusions partielles sur le chapitre n°3:

Chaque opérateur doit choisir la longueur du palpeur suivant les critères à mesurer :

1) ***Longueur du palpeur adaptée à la mesure***
2) ***Vitesse modérée à l'accostage suivant une normale de palpage (maximum 2.4m/mn).***
3) ***Le nombre de points de qualification peut être limité à 5 car les résultats de la valeur du rayon moyen sont suffisamment représentatifs pour déterminer la constante palpeur.***

Dans le paragraphe précédent, les paramètres étudiés étaient l'influence de la longueur du palpeur et de la vitesse d'accostage.
Ce paragraphe a montré la très forte influence des ces deux paramètres :
longueur des palpeurs et vitesses d'accostage
Nous avons décidé maintenant d'analyser l'influence du diamètre du palpeur.
Dans ce cas, nous avons utilisé les palpeurs proposés par le constructeur sans rallonge.
Le choix s'est porté sur des longueurs de 10 mm pour pouvoir comparer les résultats obtenus avec les valeurs du tableau n°2-1 du 2-3-1-2

3-11-1- Influence du diamètre de la bille de palpage.

Nous avons repris nos séries de 30 mesures en qualification sur 4 palpeurs de longueur 10 mm avec une vitesse d'accostage constante de 20 % (1.6 m / mn).
5 points 1 au pôle et 4 à l'équateur avec accostage normal.

Les palpeurs utilisés sont :
1) palpeur de 1 mm de diamètre
2) palpeur de 2 mm de diamètre
3) palpeur de 3 mm de diamètre
4) palpeur de 4 mm de diamètre.

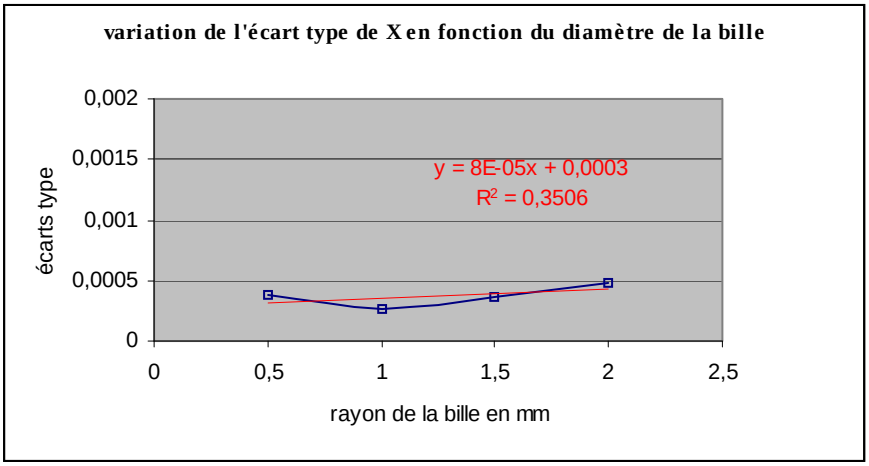
Les paramètres étudiés sont :
- Les valeurs de X, Y, et Z qui sont les coordonnées du centre de la sphère de palpage
- Le rayon de la bille
- Le défaut de sphéricité.

Pour chacun de ces critères, un calcul de l'estimateur de l'écart type a été défini.
Voici les résultats obtenus.

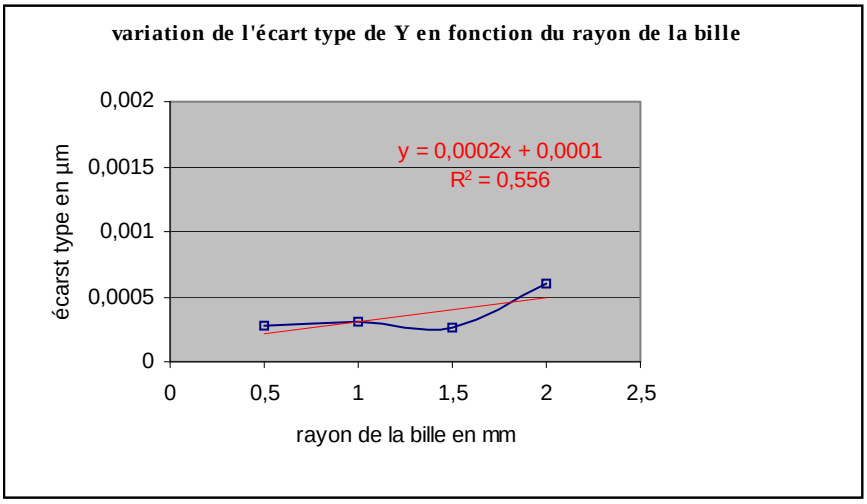
tableau n°3 41 Influence du diamètre de la bille de palpage

palpeur		x=	y=	z=	rayon=	sphèricité=
rayon 0,5mm	moyenne	-0,000351	0,0006171	0,0019288	**0,488684**	0,0006004
	écart type	0,0003769	0,0002714	0,0028153	0,0001815	0,0002056
rayon 1mm	moyenne	-0,000598	0,0006217	0,0002247	**0,991665**	0,0002333
	écart type	0,0002604	0,0003009	0,0003318	0,0002035	0,0001638
rayon 1,5mm	moyenne	-0,000334	0,0006817	0,001999	**1,494739**	0,00061
	écart type	0,0003655	0,0002566	0,0002186	0,0001591	0,0003015
rayon 2 mm	moyenne	-0,000323	0,0010137	-0,00154	**1,995924**	0,0006117
	écart type	0,0004777	0,0005947	0,0011789	0,0002860	0,0004321

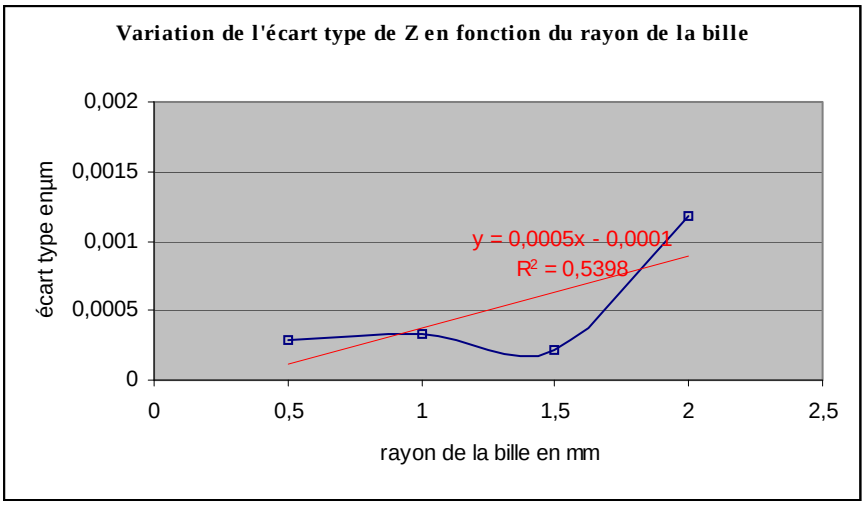
Les graphiques n°3-28 à 3-31 montrent une cohérence sur la stabilité relativement linéaire des écarts type avec une dispersion plus grande sur l'axe des z phénomène déjà constaté précédemment.



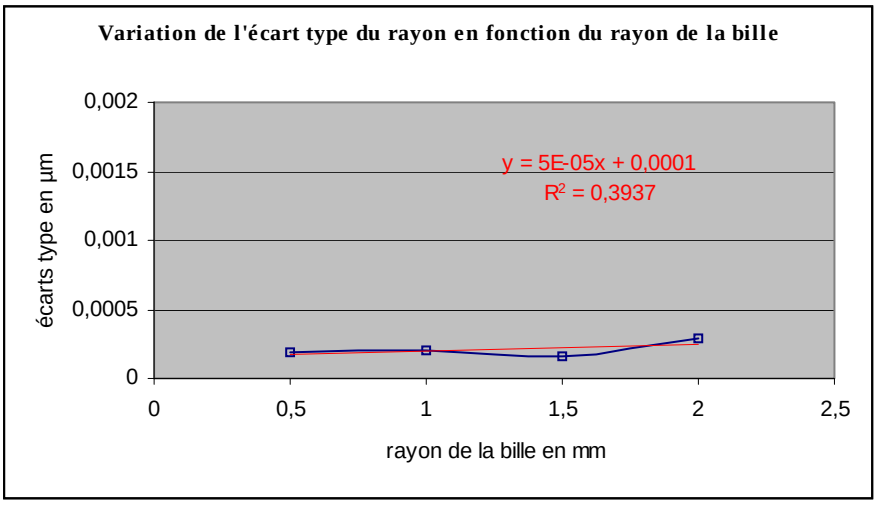
graphique n°3 28 Variation de l'écart type de x en fonction du diamètre de la bille



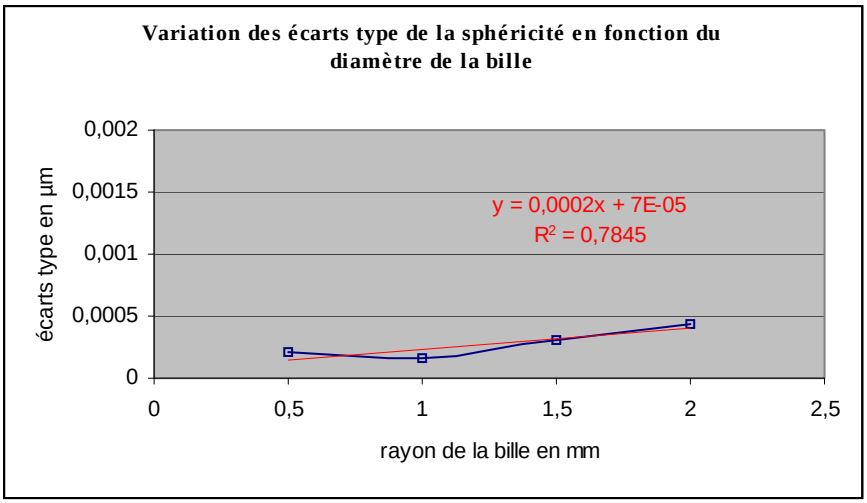
Graphique n° 3-28 bis Variation de l'écart type de y en fonction du diamètre de la bille



graphique n°3 29 Variation de l'écart type de z en fonction du diamètre de la bille



graphique n°3 30 Variation de l'écart type du rayon en fonction du diamètre de la bille



graphique n°3 31 Variation de l'écart type de la sphéricité en fonction du diamètre de la bille

3-11-2-Conclusions sur le chapitre 3-11-1

Le rayon de la bille n'a quasiment aucune influence sue l'évolution des écarts type des différents paramètres étudiés.
En effet les écarts type obtenus varient dans les incertitudes obtenues dans le tableau 2-1 du paragraphe 2-3-1-2

Nous en conclurons que le diamètre de la bille de palpage n'a aucune influence sur l'incertitude de la qualification.

CHAPITRE IV

4-1- ETUDE EXPERIMENTALE SUR LA MESURE DES ELEMENTS DE BASE ET MODELISATION DES RESULTATS

4-1-1- Objectifs

Après avoir analysé les incertitudes dans les opérations de qualification, le paragraphe 4-1 va traiter des incertitudes sur la mesure des éléments de base.
Une machine tridimensionnelle permet avant tout de mesurer des éléments géométriques de base.
Donner une incertitude dans le volume ne correspond en rien aux mesures courantes effectuées sur ce type de machine.

Nous allons traiter dans l'ordre :
- le point
- la droite
- le plan
- le cercle
- La sphère.

4-1-2- Introduction

Le principe des expérimentations repose toujours sur la même procédure.
Il est nécessaire de mesurer un élément géométriquement "parfait" pour faire apparaître les erreurs de mesure obtenues lors de ces différents éléments.
Les éléments considérés comme parfaits seront :

Une lame à faces parallèles utilisée comme miroir de renvoi. (erreur de planéité inférieure à λ/10 soit 0.06 µm)
Une bague d'étalonnage de 90 mm utilisée pour les alésomètres. (erreur de circularité 0.6µm)
Une sphère étalon de diamètre 23.835 mm pour la qualification des palpeurs. (erreur de sphéricité inférieure à 0,5 µm)

1er élément de base : le point

4-2-1- Mesure d'un point :

Afin de tester la validité des résultats sur la mesure d'un élément, nous avons effectué 4 séries de 100 mesures en configuration point sur des matériaux différents dont les surfaces avaient été préalablement rodées.
Quelles sont les variations du point en x, y, z, et des écarts type et peut-on déceler une influence du matériau sur le résultat de mesure ?
Les conditions de mesure sont celles qui dans les chapitres précédents donnaient les incertitudes minimums.

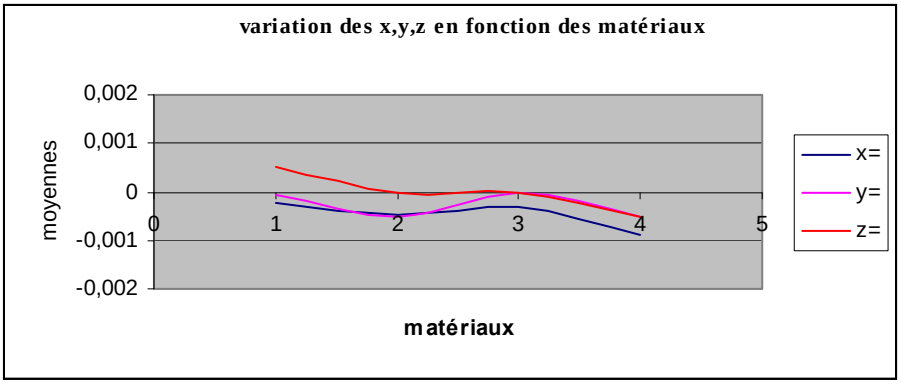
Conditions de mesure :
Palpeur longueur 10mm
Diamètre de la bille 4mm
Vitesse d'accostage 20% avec accostage normal.
Méthode de mesure :
Accostage sur un plan en manuel puis sur un point avec mise à zéro du référentiel de mesure avec un accostage normal avec x=0,y=0,z=0.
Nous avons effectué ces 100 mesures sur des matériaux différents : acier XC38, Bronze, Laiton, Duralumin pour voir si les résultats étaient influencés par la nature des matériaux mesurés.
Le tableau n° 4-1 donne les valeurs des moyennes de x, y, z pour chaque point et les écarts type correspondants.

tableau n°4 1 Variation de la moyenne et de l'écart type sur des matériaux différents de la mesure d'un point

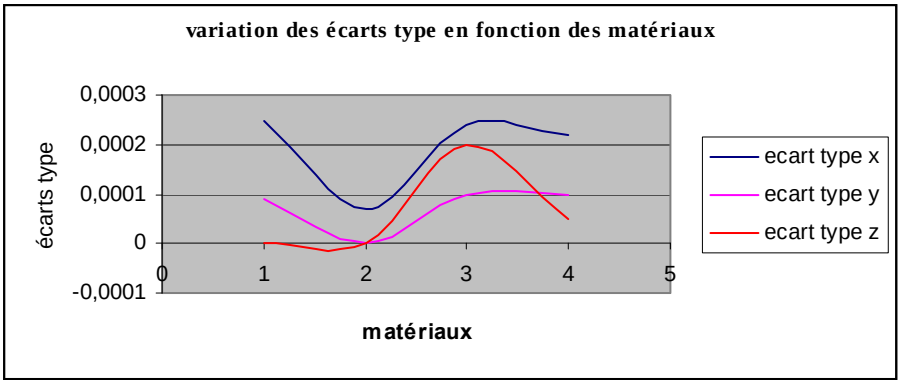
	xc38 (1)	**Bronze(2)**	**Laiton(3)**	**Duralumin(4)**
x=	-0,00021	-0,00049	-0,00031	-0,0009
y=	-0,00005	-0,0005	-0,00003	-0,0005
z=	0,0005	0	0	-0,0005
écart type x	0,000248	0,00007	0,00024	0,00022
écart type y	0,00009	0	0,0001	0,0001
écart type z	0	0	0,0002	0,00005

Le graphique n°4-1montre l'évolution des valeurs de x, y, z en fonction des 4 matériaux :
Acier XC38(1), bronze(2), laiton(3) et duralumin(4).

graphique n°4 1 variation des x, y, z en fonction des matériaux



Le graphique n° 4-2 montre l'évolution des écarts type pour les 4 même matériaux.



graphique n°4 2 évolution des écarts type pour les 4 même matériaux

Commentaire sur les graphiques 4-1et 4-2:
Le tableau n°4-1 et les graphiques n° 4-1 et n°4-2 montrent bien que malgré un accostage répétitif en x, y, z pour un point zéro la machine ne répète pas exactement au même point.
Les asservissements de la machine permettent tout de même de localiser un point pouvant varier dans une fourchette de ± 0.0005 mm.
Ce phénomène peut être déterminant dans la détermination des erreurs de forme notamment.
En effet le calcul d'un défaut de forme se faisant par une analyse des écarts par rapport à un point théorique déterminé par calcul, la valeur finale affichée sera entachée d'une erreur non négligeable liée à ce phénomène.

Par contre, l'influence du matériau ne paraît pas déterminante, les écarts type restent dans des valeurs conformes aux autres types de mesure. (entre 0 et 0.000248) ce qui confirme les valeurs du tableau de référence n°2-3 du paragraphe 2-3-1-2
Cette constatation devra être tempérée dans le cas de mesure de surfaces déformantes comme le plastique par exemple.

En composant quadratiquement les moyennes de x, y, z on obtient Is1 = 0.00021 mm.

4-2-1-1-Conclusions :

L'erreur globale de positionnement est de l'ordre ± 0.5 micromètres qui est en fait la valeur de la résolution de cette machine.
Nous pouvons penser que ce type de palpeur étant utilisé dans la plupart des machines de ce type, cette valeur n'est pas spécifique à la notre .
Cette valeur sera prise comme constante d'erreur sur le positionnement ponctuel de la machine.
Par contre l'écart type moyen composé sur un point est environ de 0.21 micromètres.

***Cette répétabilité de positionnement qui est très faible dans le cas de notre machine pourrait être un élément intéressant dans la qualification des machines à mesurer*.**

Il ne faut pas perdre de vue que toute mesure d'éléments est réalisée à partir de la mesure de points.
Il faut donc être conscient de la qualité de la mesure de ces points.
En prenant comme valeur de k (voir annexe D) égal à 2, l'incertitude globale Is sur un point se calcule comme suit (annexe b : méthode de calcul des incertitudes)
0.5 µm est une erreur de type B (erreur de résolution ou de quantification) et 0.21µm est une erreur de type A, le calcul d'incertitude devient :

$$Is = \sqrt{(0.5/\sqrt{3})^2 + (0.21)^2} = 0.36$$

Soit Ig=2 Is (positionnement sur un point)

***Ig*= ± 0.72µm avec k=2.**

2éme élément de base : la droite.

4-2-2 Mesure d'une droite

Nous allons maintenant déterminer les incertitudes de mesure sur un élément de base qui est une droite.
Les incertitudes de mesure d'une droite dépendent d'une part de tous les paramètres déjà étudiés :
- longueur du palpeur
- vitesse d'accostage
- angle d'accostage
- diamètre de la bille.

Ces différents paramètres seront déduits des mesures déjà effectuées.
Mais le calcul de la rectitude dépend aussi en partie du nombre de points pris en compte dans le calcul.
Nous allons étudier l'influence du nombre de points minimum pour obtenir un résultat significatif.

4-2-3- Objectifs

L'objectif est de définir le nombre de points à partir duquel le résultat donné par le logiciel se stabilise et quelle est la constante d'erreur minimum que l'on doit prendre en compte lors de la mesure d'une droite.

4-2-3-1 - Différentes mesures effectuées :

Afin de tester la validité des résultats sur la mesure d'une droite, nous avons effectué 9 mesures de rectitude, chacune de ces séries comporte 30 mesures avec la procédure interne au logiciel (moindres carrés).
La méthode des moindres carrés a été choisie car la plupart des logiciels anciens n'intégraient pas la méthode tchebyshef.
Les résultats obtenus sont très peu différents entre les deux méthodes . **[72]**
L'élément mesuré est un miroir optique dont la planéité est considérée comme nulle (erreur de planéité inférieure à $\lambda/10$).
On peut donc assimiler une droite mesurée sur ce plan comme un défaut de rectitude assimilé à un défaut nul.
Nota: pour chaque mesure de rectitude (4 points, 8 points etc.), le tableau n°4-2-2 est le récapitulatif des 30 mesures avec un nombre de points variant de **n** points (de 4 à 100 points)

Conditions de mesure :
Palpeur longueur 10mm
Diamètre de la bille 4mm
Vitesse d'accostage 20% avec accostage normal.

La mesure a été faite sur une longueur de 100 mm dans le sens des x positifs.
Les points extrêmes sont toujours séparés par la même distance de 100 mm de manière à avoir toujours le même déplacement et intégrer le défaut de planéité (donc de rectitude suivant un axe) propre à la machine.

Le paramètre étudié dans le paragraphe précédent était la répétabilité du point.
L'incertitude combinée sur les trois axes et la résolution de l'afficheur nous donnait ± 0.72 µm.
Comment se comporte la machine quand une série de points sont utilisés pour calculer un défaut de rectitude ?

4-2-3-2- Procédure

La procédure de mesure est définie par le graphique n°4-1
La distance considérée reste constante sur 100 mm .

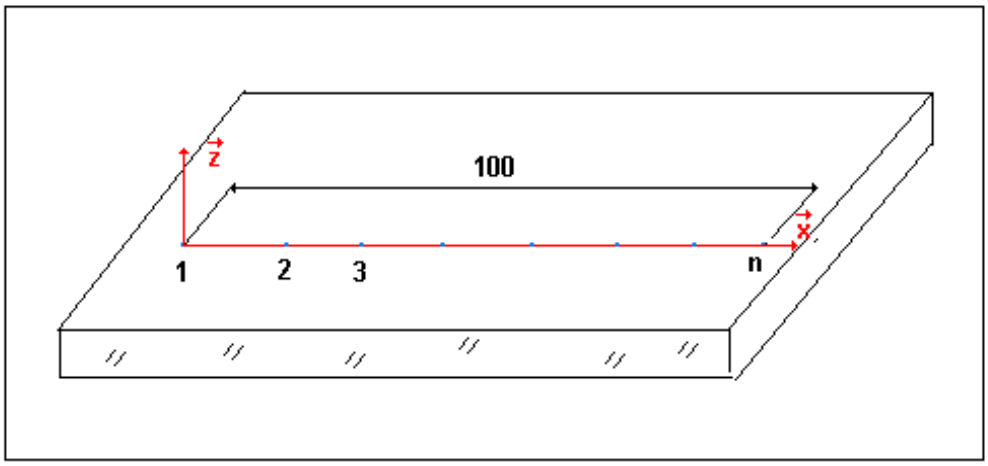


fig n°4 1 Procédure

tableau n°4 2 Variation de la rectitude sur 30 mesures en fonction du nombre de points

droite 4	droite 8	droite 16	droite 20	droite 30	droite 36	droite 50	droite 75	droite 100
0,00044	0,00093	0,00197	0,00155	0,0022	0,00211	0,00275	0,0022	0,00188
0,00077	0,00096	0,00096	0,00107	0,00143	0,00181	0,00267	0,00264	0,00244
0,00076	0,0009	0,00098	0,00101	0,0014	0,00184	0,00271	0,0027	0,00259
0,00067	0,00115	0,00091	0,00121	0,00142	0,00171	0,00268	0,00226	0,00262
0,00063	0,00088	0,00097	0,00112	0,00148	0,00159	0,00309	0,00267	0,00255
0,00047	0,00117	0,00142	0,00111	0,00136	0,00155	0,00274	0,00213	0,00305
0,00045	0,00076	0,00093	0,00051	0,00134	0,00164	0,00307	0,0028	0,002
0,00044	0,00082	0,00147	0,00077	0,00123	0,00157	0,00265	0,00221	0,00211
0,00045	0,00097	0,00148	0,00067	0,0014	0,00195	0,00268	0,00216	0,00253
0,00077	0,00079	0,00139	0,00056	0,00137	0,00222	0,00231	0,00229	0,00203
0,00077	0,00087	0,00169	0,001	0,00203	0,0017	0,00178	0,00221	0,00254
0,00097	0,00081	0,00139	0,00099	0,00141	0,00162	0,00268	0,00227	0,00205
0,00098	0,00081	0,00108	0,00144	0,00143	0,00125	0,00215	0,00218	0,00209

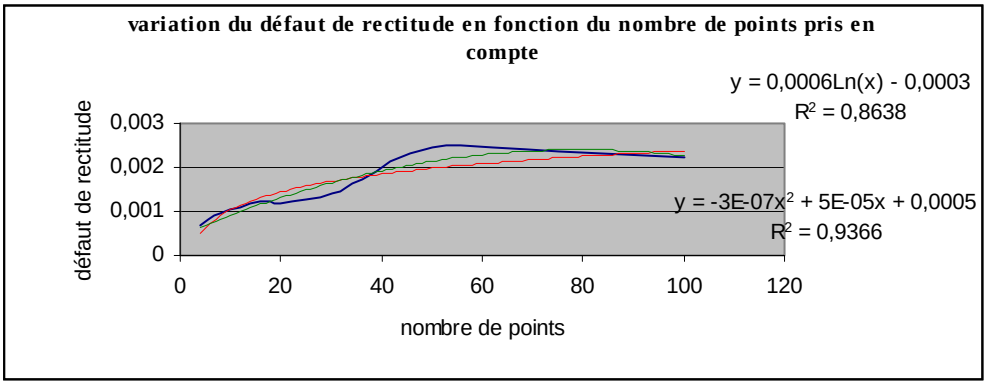
0,00087	0,00105	0,001	0,0007	0,00099	0,00159	0,00258	0,00222	0,00212
0,00041	0,00084	0,00109	0,00092	0,001	0,00161	0,00268	0,00221	0,00261
0,00078	0,00125	0,00135	0,00151	0,00187	0,00171	0,0022	0,00223	0,00257
0,00077	0,00108	0,00143	0,00142	0,00085	0,00171	0,00223	0,00271	0,0021
0,00078	0,0008	0,00155	0,00075	0,00186	0,00134	0,00231	0,00266	0,00261
0,00078	0,00077	0,00117	0,00153	0,00175	0,00167	0,00263	0,00223	0,0021
0,00045	0,00078	0,00112	0,00198	0,00138	0,0022	0,00231	0,0022	0,00201
0,00082	0,00109	0,00098	0,00147	0,00127	0,00158	0,00225	0,00229	0,00209
0,00083	0,00109	0,00096	0,0012	0,00143	0,00222	0,00214	0,0027	0,00205
0,00083	0,00108	0,00102	0,00109	0,00145	0,00171	0,00228	0,00234	0,00206
0,00083	0,00109	0,00089	0,00103	0,00133	0,00176	0,00216	0,0017	0,00203
0,00068	0,00112	0,00104	0,001	0,00185	0,00156	0,00263	0,00219	0,00202
0,00044	0,00082	0,00109	0,00106	0,00146	0,00181	0,00223	0,00273	0,0021
0,00063	0,00088	0,00153	0,00159	0,00142	0,00179	0,00258	0,0027	0,00209
0,00054	0,00092	0,00167	0,00185	0,00137	0,00173	0,00172	0,00232	0,0021
0,00055	0,00083	0,00099	0,0014	0,00099	0,00169	0,00258	0,00214	0,00212
0,00045	0,00086	0,00133	0,00121	0,00097	0,00169	0,00266	0,00228	0,00209

Le tableau n°4-3 donne les valeurs de la moyenne des défauts de rectitude et les écarts type sur chaque série de 30 mesures.

tableau n°4 3 moyenne des défauts

droite 4	droite 8	droite 16	droite 20	droite 30	droite 36	droite 50	droite 75	droite 100
0,000667	0,00094	0,00123	0,00116	0,00142	0,00173	0,002471	0,002352	0,002245
0,000177	0,00014	0,00028	0,00036	0,00031	0,00023	0,000323	0,000257	0,000282

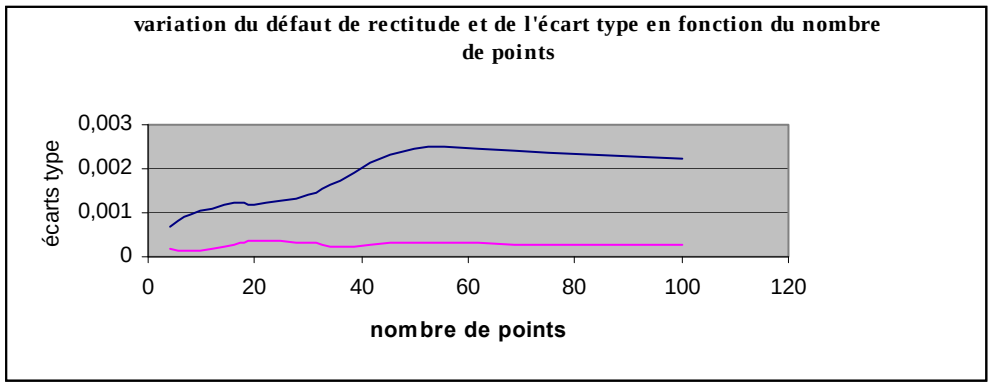
graphique n°4 3 variation de l'écart de rectitude en fonction du nombre de points



Analyse :
Le graphique n°4-3 montre une variation qui semble se stabiliser au-delà de 40 à 50 points.
Les deux modèles mathématiques proposés donnent une valeur de R^2 très proche et un coefficient de corrélation compris entre 0.92 et 0.96.
Pour ces valeurs minimums, la constante d'erreur de rectitude est de 0.0025 mm.

C’est cette valeur qui sera prise comme base de défaut minimum donnée par le palpeur, la machine et le logiciel de calcul.
L’écart type, par contre, est significatif au-delà de 16 points.

Le graphique 4-4- regroupe les valeurs des rectitudes et des écarts type.



graphique n°4 4 variation de la linéarité et l’écart type en fonction du nombre de points

Le modèle statistique défini dans le paragraphe n°2-1 est vérifié en grande partie au-delà de 30 mesures et totalement vérifié entre 40 et 50 mesures.
Nous pouvons dire que la rectitude se stabilise à partir de 40 mesures, ce nombre de mesures étant rarement utilisé.
On donnera donc comme constante d'erreur minimum une valeur de 0.0025 mm.
Cette valeur sera prise en compte comme valeur globale (type B), à laquelle s'ajoutera un écart type moyen de 0.00027 mm qui est la valeur stabilisée au-delà de 16 points.
Ces valeurs devront être présentes dans l'esprit des opérateurs de machines à mesurer, car il toujours dangereux d'assimiler des machines 3D à des appareils de mesures de forme.

4-2-3-3-Conclusions générales sur la mesure d'une droite :

La mesure de la rectitude est entachée d'une incertitude qui est de la forme :

$$Is = \sqrt{(cte/3)^2 + f^2}$$

Ou Cte est la constante d'erreur et f est l'erreur de fidélité.
Ce qui donne avec k=2 (annexe B) et n >40 :

$$Is = \sqrt{(0.0025/3)^2 + (0.00027)^2} = 0.00087 * 2 = 0.00175$$

Ig(rectitude)=+/-0.00175mm

Nota:
Le logiciel de notre machine calcule le défaut de rectitude cumulé dans les 3 plans de projection.
C'est donc un défaut de rectitude dans l'espace.

3éme élément de base : le plan.

4-3-1 Mesure d'un plan

Nous allons maintenant déterminer les incertitudes de mesure sur un élément de base qui est un plan.
Les incertitudes de mesure d'un plan dépendent d'une part de tous les paramètres déjà étudiés :
- longueur du palpeur
- vitesse d'accostage
- angle d'accostage
- diamètre de la bille.

Ces différents paramètres seront déduits des mesures déjà effectuées.
Mais le calcul de la planéité dépend aussi en partie du nombre de points pris en compte dans le calcul.
Nous allons étudier l'influence du nombre de points minimum pour obtenir un résultat significatif.

4-3-2- Procédure

Les procédures de mesure sont définies ci-après .

4-3-3- Objectifs

L'introduction du paragraphe 4-2-2 page 139 reste valable, la mesure d'un plan pose les mêmes questions :
Quel le nombre de points significatif dans la mesure d'un plan ?

4-3-3-1- 1ere procédure :

Afin de tester la validité des résultats sur la mesure d'un plan, nous avons effectué 8 séries de 30 mesures sur le même plan optique que la mesure de rectitude de planéité nulle (erreur de planéité inférieure à $\lambda/10$).
Les mesures se feront sur un carré de départ de 20mm x 20 mm, augmentant de 10 en 10 mm jusqu'à 90 x 90 mm.
Nous avons volontairement appliqué cette 1ere procédure pour faire apparaître l'influence du défaut de forme du marbre supportant le portique mobile.
La question qui se pose est de savoir à partir de quel nombre de points le résultat donné par le logiciel se stabilise et quelle est l'erreur minimum donnée par le logiciel.
Conditions de mesure :
Palpeur longueur 10mm
Diamètre de la bille 4mm
Vitesse d'accostage 20%.

1ere série de mesures :

9 points	carré de 20x20 mm
16 points	carré de 30x30 mm

25 points	carré de 40x40 mm
36 points	carré de 50x50 mm
49 points	carré de 60x60 mm
64 points	carrés de 70x70 mm
81 points	carré de 80x80 mm
100 points(*)	carré de 90x90 mm

Le tableau n°4-2-1 montre les résultats de 30 mesures de planéité déterminée sur 90 mm x 90mm en 100 points.

tableau n°4 4 exemple des résultats sur série(*) de 30 mesures de la planéité de 100 points :

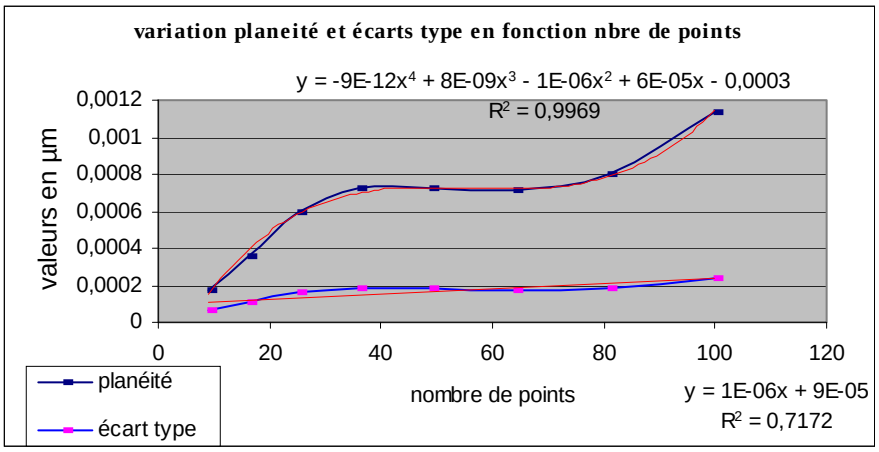
n° ordre	**planéité**	**écart type partiel sur 100 points**
1	0,00212	0,0003
2	0,00157	0,0003
3	0,00104	0,00023
4	0,00114	0,00027
5	0,00111	0,00025
6	0,00159	0,00036
7	0,00115	0,00026
8	0,00086	0,00022
9	0,00096	0,00021
10	0,00093	0,0002
11	0,00107	0,00022
12	0,00138	0,00027
13	0,00097	0,00022
14	0,00131	0,00029
15	0,00108	0,00022
16	0,00099	0,00022
17	0,00106	0,00024
18	0,00091	0,00022
19	0,00116	0,00024
20	0,00098	0,0002
21	0,00087	0,00021
22	0,00134	0,00025
23	0,00114	0,00027
24	0,00117	0,00022
25	0,00091	0,00021
26	0,00093	0,0002
27	0,00103	0,0002
28	0,00111	0,00022
29	0,00097	0,00021
30	0,00128	0,00028
moyennes	**0,00113767**	**0,00024033**

Nota: les différents résultats ne figurent pas mais le tableau n°4-5 est le récapitulatif des résultats obtenus.

tableau n°4 5 Récapitulatif des résultats sue la planéité en fonction du nombre de points :

nombre de mesures	planéité	écart type
9	0,00017	0,00006
16	0,00036	0,00011
25	0,00059	0,00016
36	0,00072	0,00018
49	0,00072	0,00018
64	0,00071	0,00017
81	0,0008	0,00018
100	0,00114	0,00024

Le graphiques n°4-5 montre les variations de la planéité et des écarts type en fonction du nombre de points



graphique n°4 5 variations de la planéité et des écarts type en fonction du nombre de points

Le résultat fait apparaître un point d'inflexion entre 40 et 60 points ce qui semble montrer que la variation intègre le nombre de mesures mais aussi probablement les erreurs de planéité du marbre de la machine.

4-3-3-2- 2eme procédure

Il est donc nécessaire de reprendre les mesures en stabilisant la surface de mesure du plan optique en la fixant à 90 x 90mm et en modifiant comme précédemment le nombre de mesures par une modification du pas de déplacement en x et y.
En effet pour des plans de grandes dimensions, la référence de calcul n'est pas constante car la surface augmente progressivement.
La méthode de calcul par les moindres carrés suppose que la référence est la même tout au long de la mesure.
Il était donc impossible de conclure sur les influences du nombre de points dans les conditions de la procédure 1.

Procédure modifiée :

Nous avons donc repris la même série de 30 mesures avec une variation de 9 à 100 points mais en fixant toujours la même surface de 90 mm x 90 mm.
Seuls les pas de déplacement en X et Y ont changé.

Voici le même exemple que le tableau n°4-4 sur 30 mesures de plan en 100 points.

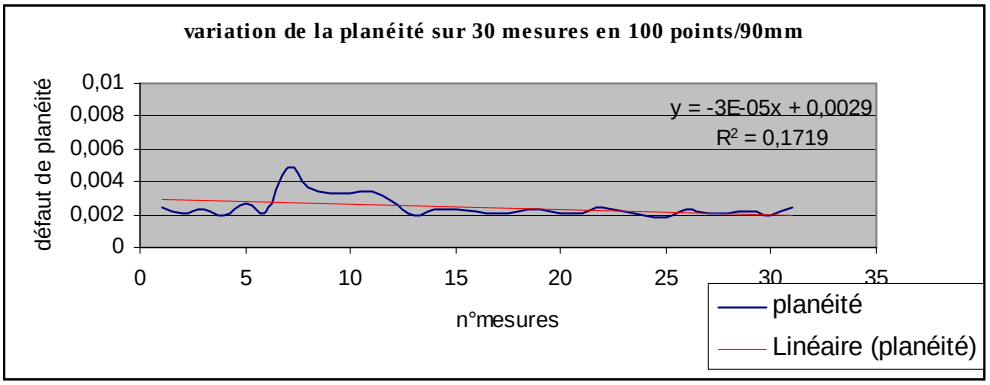
tableau n°4 6 Résultats de la mesure d'un plan pour 100 mesures sur 90mm x 90mm.

n° ordre	planéité	écart type partiel
1	0,00249	0,0003
2	0,0021	0,00028
3	0,00236	0,00027
4	0,00201	0,00032
5	0,00268	0,00031
6	0,00222	0,00026
7	0,00487	0,00053
8	0,00364	0,00041
9	0,00334	0,0004
10	0,00332	0,0004
11	0,00338	0,00042
12	0,00282	0,00036
13	0,00195	0,00029
14	0,00226	0,0003
15	0,00236	0,00029
16	0,00214	0,00029
17	0,00207	0,0003
18	0,0022	0,00027
19	0,00227	0,00028
20	0,00209	0,00029
21	0,00204	0,00027
22	0,00244	0,00028
23	0,00217	0,00027
24	0,002	0,00027
25	0,00179	0,00026

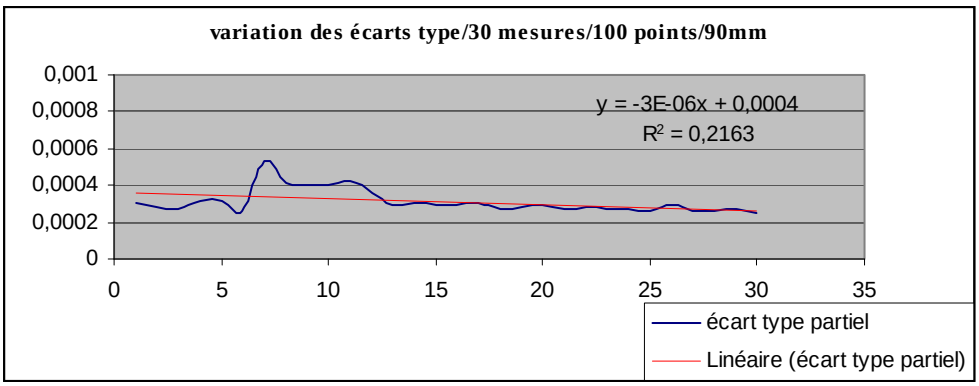
26	0,00231	0,00029
27	0,00206	0,00026
28	0,00208	0,00026
29	0,00221	0,00027
30	0,00195	0,00025
moyenne	**0,002454**	**0,00030833**

Les graphiques 4-6 et 4-7 représentent les valeurs obtenues pour la série de 30 mesures d'un plan en 100 points (planéité et écart types).

graphique n°4 6 *variation planéité sur 100 mesures sur 90mm x 90mm*



graphique n°4 7 *variation des écarts type sur 100 mesures sur 90mm x 90mm*



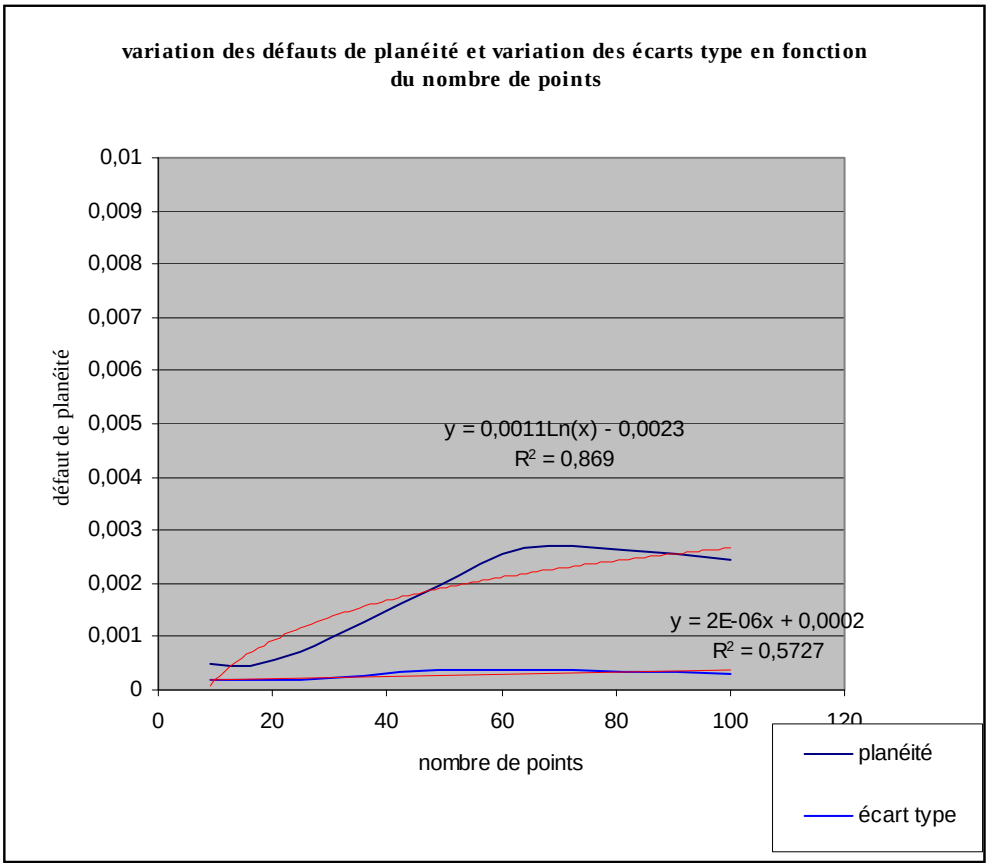
Les résultats font apparaître une variation importante entre les 8 me et 12 mesures du plan qui n'apparaissent pas cohérentes sur la série de 100 mesures.
Toutefois ces mesures ne me paraissent pas très significatives car elles influent peu ou pas sur le résultat global.
Une hypothèse parmi d'autres ?
Une instabilité momentanée de la pression d'arrivée d'air comprimé qui a modifié l'épaisseur du film d'air qui supporte le portique.
Après vérification du compresseur par le service de maintenance le phénomène ne s'est plus reproduit.
J'en ai déduit que la cause pouvait être liée à l'hypothèse précédente.

Le tableau n°4-7 est le récapitulatif des valeurs moyennes (sur 30 mesures) obtenues dans la mesure d'un plan en variant le nombre de points de 9 à 100 points.

tableau n°4 7 tableau de mesure du plan en fonction du nombre de points.

nombre de mesures	**planéité**	**écart type**
9	0,000502	0,00019
16	0,00045	0,00017
25	0,00073	0,000199
36	0,00128	0,000249
49	0,00197	0,00036
64	0,00267	0,000392
81	0,00264	0,00034
100	0,00245	0,000308

Moyenne écart type de la planéité 0.00025 mm



graphique n°4 8 variation des défauts de planéité en fonction du nombre de points.

En examinant la courbe ci dessus, on en déduit :

1) Le nombre de mesures minimum pour la mesure d'un plan se situe entre 49 et 64 mesures, la formule de stabilisation est sensiblement identique à celle obtenue pour la rectitude.

2) La constante d'erreur pour la mesure de planéité est de 0.0027 mm de constante d'erreur et l'écart type est de l'ordre de 0.00025 mm ce qui confirme les mesures préliminaires 21et tableau n°2-3). (0.00024 mm).

Afin de voir si le palpage sur une surface inclinée à 30° a une influence sur le résultat, nous avons utilisé un plateau sinus avec le même plan optique, tout en conservant un accostage suivant la normale du plan.

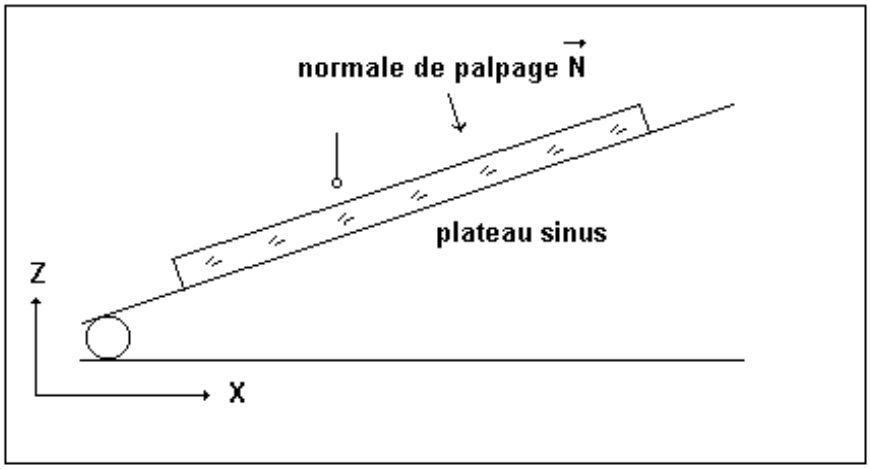
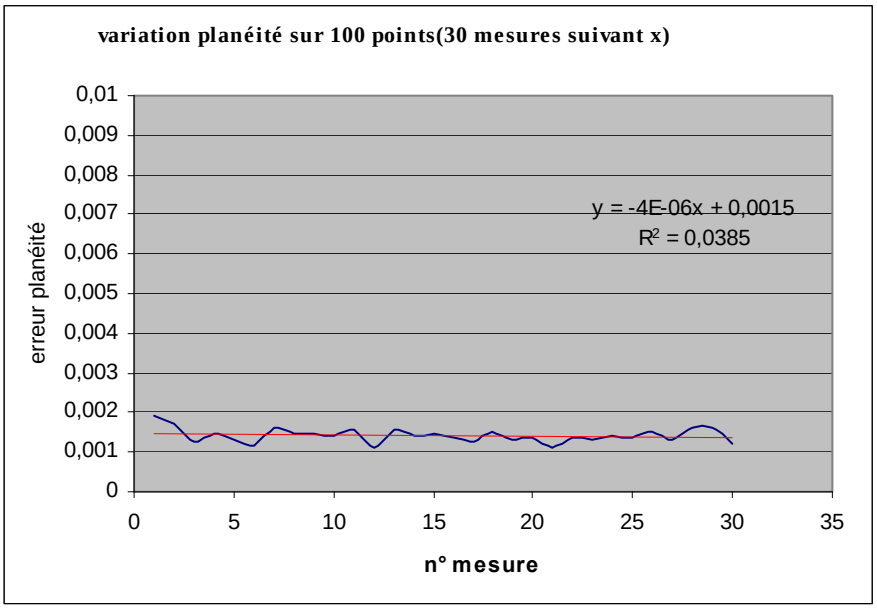


fig n°4 2 Orientation de 30° suivant x du plan optique

graphique n°4 9 variations dans le plan x, z :



Erreur de planéité : 0.0015 mm **écart type :** 0.00028mm
On modifie l'orientation du plateau sinus dans le sens y, z.

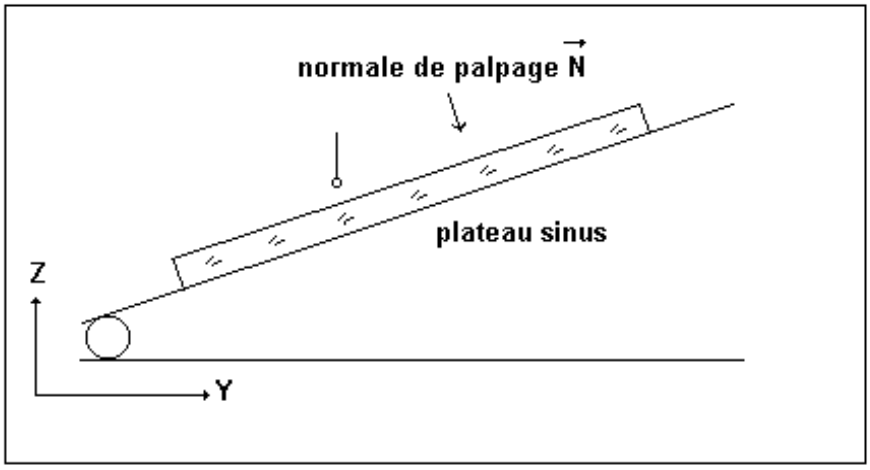
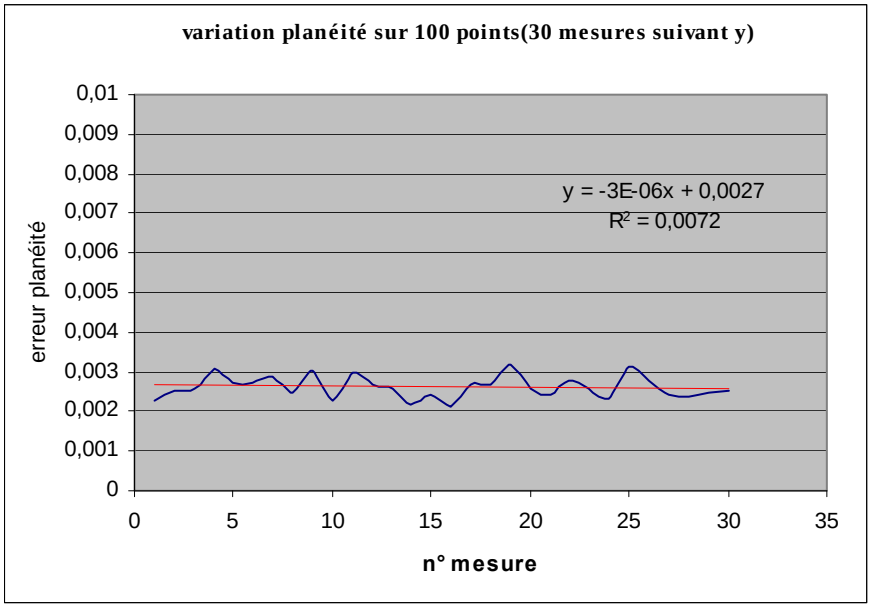


fig n°4 3 Orientation de 30° suivant y du plan optique

graphique n°4 10 Variations dans le plan x, z :



Erreur de planéité : 0.0027mm **écart type moyen :** 0.00026mm

Nous avons constaté que l'accostage suivant l'axe y donne des valeurs supérieures à l'axe x. Mais cela reste dans l'ordre des incertitudes sur l'erreur de forme de la mesure d'un plan. Nous prendrons toutefois le cas le plus défavorable.

4-3-3-3-Conclusions sur la mesure d'un plan :

Dans la mesure d'un plan, la constante minimum est de l'ordre de 0.0027 mm.
Ce qui confirme les résultats de la rectitude. En effet, si on considère qu'un plan est la composition de deux rectitudes et que les répartitions sont de type gaussien et indépendantes à a priori, on pourra composer quadratiquement les deux valeurs de 0.0025 mm de la rectitude.
Δp= erreur de planéité et écart type moyen rectitude= 0.00025

$$Is = \sqrt{(0.0035/3)^2 + (0.00025)^2} = 0.0012$$

Et Ig(plan) = ± 0.0024 ***avec k=2.***

4éme élément de base : le cercle.

4-4-1 mesure d'un cercle

Nous allons maintenant déterminer les incertitudes de mesure sur un élément de base qui est un cercle.
Les incertitudes de mesure d'un cercle dépendent d'une part de tous les paramètres déjà étudiés :
- longueur du palpeur
- vitesse d'accostage
- angle d'accostage
- diamètre de la bille.

Ces différents paramètres seront déduits des mesures déjà effectuées.
Mais le calcul de la circularité dépend aussi en partie du nombre de points pris en compte dans le calcul.
Nous allons étudier l'influence du nombre de points minimum pour obtenir un résultat significatif.
.

4-4-2- Procédure

Les procédures de mesure sont définies ci-après .

4-4-3- Objectifs

L'introduction du paragraphe 4-2-2 page 139 reste valable, la mesure d'un cercle pose les mêmes questions :
Quel le nombre de points significatif dans la mesure d'un cercle ?

4-4-4- méthode de mesure du cercle

*La mesure d'une droite ou d'un plan donne des écarts entre un élément parfait (droite ou plan), suivant une seule direction, la normale à la droite ou au plan des moindres carrés calculés par le torseur des petits déplacements***[72],[51]**
Dans la mesure d'un cercle, le calcul des écarts est obtenu par la position réelle du centre de la bille de palpage par rapport à un repère défini au préalable par une mesure provisoire d'un cercle en 3 points ..

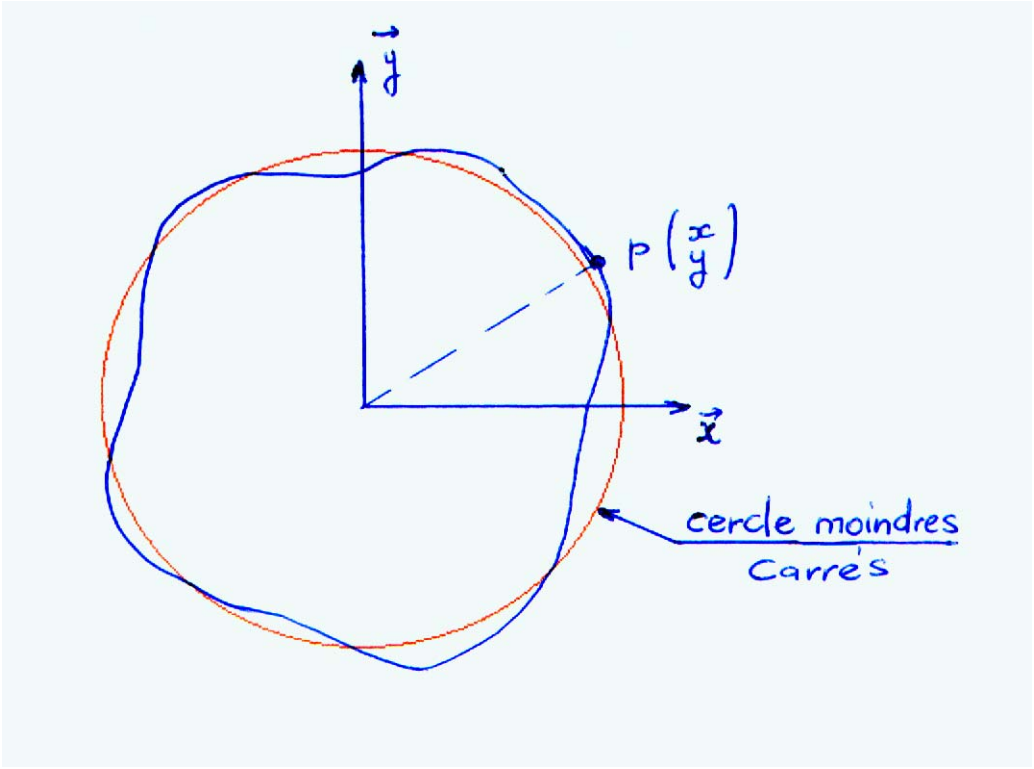


fig n°4 4 Principe de contrôle de la circularité

La mesure de ce cercle est faite en deux étapes :

1) Utilisation du logiciel de la machine.
2) Utilisation d'un programme spécifique pour comparer les différents résultats.

Dans tous les cas, la mesure a été réalisée en palpant les points du cercle de manière à avoir un accostage normal à la matière.

Dans les procédures classiques, les résultats donnés par la machine sont :

- Les coordonnées du centre du cercle. (x ,y), (x ,z) ou (y ,z) dans le plan mesuré.
- Le diamètre moyen.
- Le défaut de circularité.

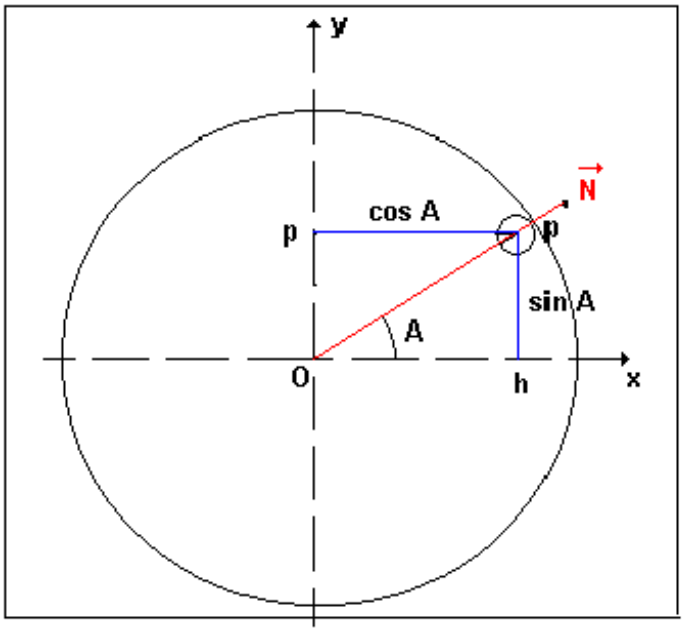
Les résultats obtenus sont comparés aux différentes tolérances imposées par le bureau

d'études et on déclare la pièce valide ou non.

fig n°4 5 Exemple de mesure d'un cercle en 6 points avec le logiciel Wtutor

4-4-4-1- Principe de mesure

La figure n° 4-6 montre le principe classique de mesure d'une bague avec accostage normal au



point p.

fig n°4 6 Méthode de calcul

première série de mesures

Les résultats obtenus sur la mesure en 100 points d'une bague de calibrage d'un alésomètre de 90mm de diamètre sont donnés dans le tableau n°4-8
Les conditions de mesure sont :
Palpeur de longueur 10 mm
Diamètre de la bille 4 mm
Vitesse d'accostage 20 % (1.6m/mn)
Valeurs de la bague 90.00034mm (incertitude du laboratoire ±0.0017 mm)

Cette bague a été étalonnée par un centre d'étalonnage accrédité, l'Institut Méditerranéen de la Qualité.

Les valeurs (voir annexe F) donnés par ce centre sont :
Diamètre moyen suivant 2 directions perpendiculaires en 2 plans de mesure : 90.0037 mm.
Erreur de circularité sur 500 points : 0.0002 mm (contrôleur de circularité)

tableau n°4 8 mesure bague en 100 pts

Mesures	x=	y=	z=	diamètre	erreur circularité
1	-0,00275	-0,00191	0,00032	89,99987	0,01697
2	-0,00365	-0,00157	0,00082	90,00002	0,01057
3	-0,00352	-0,00115	0,00082	89,99959	0,00979
4	-0,00342	-0,00094	0,00082	89,99946	0,01085
5	-0,00317	-0,00094	0,00032	89,99982	0,01076
moyennes	-0,003302	-0,001302	0,00062	89,999752	0,011788

1ere conclusion :

Le diamètre donné par le logiciel sur une moyenne de 5 mesures en 100 points est de 89.9997 soit une différence de 90.0034 - 89.99997= -3.43 µm

L'erreur de circularité calculée par le logiciel est de 11.8 µm alors que le laboratoire de L'IMQ (annexe F) donne 0.6µm.

Les différentes questions que l'on peut se poser sont :
1) Pourquoi une erreur de **-3.43 µm** sur le diamètre et un défaut de circularité de **11.8 µm** ?
2) La méthode de calcul utilisée par le logiciel est-elle celle des moindres carrés ?
3) La méthode de qualification du palpeur est-elle rigoureuse ?
4) Cette erreur est-elle dépendante du nombre de points, de la vitesse d'accostage, du diamètre mesuré etc.?

Programme réalisé :
Nous avons réalisé un programme spécifique de mesure (annexe G procédure Mpick) afin de mesurer la même bague d'étalonnage d'alèsomètre.

Ce programme ne mesure pas un cercle mais une série de points(100) qu'elle compare à des points théoriques en fonction de l'angle et du rayon.
La récupération des différents points (centre de la bille de palpage) est traitée sous Excel pour effectuer les différents calculs.
La variation du rayon Δr est pas prise en compte dans le calcul car l'origine est très proche du centre réel.
Les valeurs sont recalculées par la suite après optimisation. **[2],[51],[72]**

Méthode de calcul des coordonnées pluckérienne (dite méthode des torseurs de petits déplacements).
Pour chaque angle θi on mesure un écart ξi
Exemple:

On mesure un cercle en 9 points de 40° en 40°, pour chaque angle, on définit un écart par rapport à un rayon de base. (rotation autour de l'axe x)

tableau n°4 9 exemple

θi (en °)	**0**	**40**	**80**	**120**	**160**	**200**	**240**	**280**	**320**
ξi (µm)	**0**	**+12**	**-25**	**-2**	**-11**	**-14**	**-14**	**+10**	**+15**

<u>Développement mathématique</u> :

A partir de la loi :

$W = \Sigma\, ei^2$ = est minimal

et de la loi générale qui s'applique aux petits déplacements ou l'équation générale est :

$$ei = \xi i - (dx + d\alpha y.z_i - d\alpha z.y_i)n_i x - (dy + d\alpha z.x_i - d\alpha x.z_i)n_i y - (dz + d\alpha x.y_i - d\alpha y.x_i)n_i z \quad (1)$$

e est optimal pour W mini $\rightarrow \frac{\delta W}{\delta d\alpha x} = 0, \frac{\delta W}{\delta d\alpha y} = 0\ \frac{\delta W}{\delta d\alpha z} = 0, \frac{\delta W}{\delta dx} = 0, \frac{\delta W}{\delta dy} = 0, \frac{\delta W}{\delta dz} = 0$ (2)

des équations (1) et (2)

on tire :

$e_i = \xi_i$ - dy.cos ϑ_i - dz sin ϑ_i

e est minimal pour $\frac{\delta W}{\delta dy} = 0 = \sum e_i \frac{\delta e_i}{\delta dy}$

$\frac{\delta e_i}{\delta dy} = -\cos\vartheta_i$ $\qquad$ $\frac{\delta e_i}{\delta dz} = -\sin\theta_i$

$$\sum(\xi_i - dy.\cos\vartheta_i - dz.\sin\vartheta_i) - \cos\vartheta_i$$

$$\sum dy.\cos^2\vartheta_i - \Sigma dz.\sin\vartheta_i.\cos\theta_i) - \Sigma\xi_i\cos\vartheta_i \quad (1)$$

<u>de la même manière</u> :

e est minimal pour $\frac{\delta W}{\delta dz} = 0 = 2\sum e_i \frac{\delta e_i}{\delta dz}$

$$\sum(\xi_i - dy.\cos\vartheta_i - dz.\sin\vartheta_i) - \sin\vartheta_i$$

$$\sum dy.\cos\vartheta_i.\sin\vartheta_i - \Sigma dz.\sin^2\vartheta_i - \Sigma\xi_i.\sin\theta_i \quad (2)$$

<u>En mettant sous forme matricielle</u> :

$$\begin{pmatrix} \sum\cos^2\vartheta_i & \sum\sin\vartheta_i.\cos\vartheta_i \\ \sum\cos\theta_i.\sin\vartheta_i & \sum\sin^2\vartheta_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dy \\ dz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum\xi i.\cos\vartheta_i \\ \sum\xi i.\sin\vartheta_i \end{pmatrix}$$

en posant $dz = \frac{\Delta dz}{\Delta}$ $\qquad$ et $dy = \frac{\Delta dy}{\Delta}$

on obtiendra :

$$dy = \frac{(\Sigma\xi i.\cos\vartheta_i i)(\Sigma\sin^2\vartheta_i) - (\Sigma\xi_i.\sin\theta_i)(\Sigma\sin\vartheta_i.\cos\theta_o)}{(\Sigma\cos^2\vartheta_i)(\Sigma\sin^2\vartheta_i) - (\Sigma\sin\vartheta_i.\cos\vartheta_i)^2)}$$

$$dz = \frac{\Sigma(\cos^2\theta i)(\Sigma\sin^2\theta_i) - (\Sigma\vartheta_i.\sin\vartheta_i)(\Sigma\sin\vartheta_i.\cos\vartheta_i)}{(\Sigma\cos^2\vartheta_i)(\Sigma\sin^2\vartheta_i) - (\Sigma\sin\vartheta_i.\cos\vartheta_i)^2)}$$

<u>Pour déterminer l'erreur de circularité</u> :

Δc = (ei max)-(ei min)
ou = *Sup.ei – Inf .ei*

Le programme calcule pour chaque angle A, la position théorique du centre de la bille de palpage, avec une position d'approche de manière à accoster suivant une direction passant par le centre O de la bague.
La méthode du calcul des torseurs de déplacements en p, défini dans un premier temps l'écart entre le point théorique et le point réellement palpé, puis par calcul détermine les déplacements dx et dy donnant le vrai centre de la forme mesurée et enfin le cercle des moindres carrés ainsi que les cercles tangents maxi et mini.

Conditions de mesure :
Palpeur longueur 10mm
Diamètre de la bille 4mm
Vitesse d'accostage variant de 10% à 100%.

Résultats de mesures :

Un premier tableau n°4-11 présente le calcul de l'écart **ξi** en µm

tableau n°4 10 calcul de l'écart

Ang θi	Cos θi	sin θi	X théo en µm	Y théo en µm	Rayon théo en µm	X mesuré	Y mesuré	Rayon mesuré	Ecarts ξi (µm)
0	1	0	43000	0	43000	430005.45	3.15	430005.45	-5.450115
3.6	0.9980267	0.0627905	42915.149	2699.9923	43000	42922.33	2695.65	43006.894	-6.894117

Etc.

Le deuxième tableau n°4-11 montre le calcul des écarts optimisés ei

tableau n°4 11 calcul des écarts optimisés ei

Ang θi	**Ecarts ξi (µm)**	**Cos θi**	**sin θi**	**Cos θi* sin θi**	**(Cos θi)²**	**(sin θi)²**	**ξi *Cos θ i**	**ξi * sin θi**	**ei(µm)**
0	-5.450115	1	0	0	1	0	-5.450115	0	7.70
3.6	-6.894117	0.998 0267	0.06279 05	0.06266 66	0.996057 4	0.00394 26	-6.880513	-0.432885	-9.16

Etc...

Les résultats donnent :

tableau n°4 12 résultats

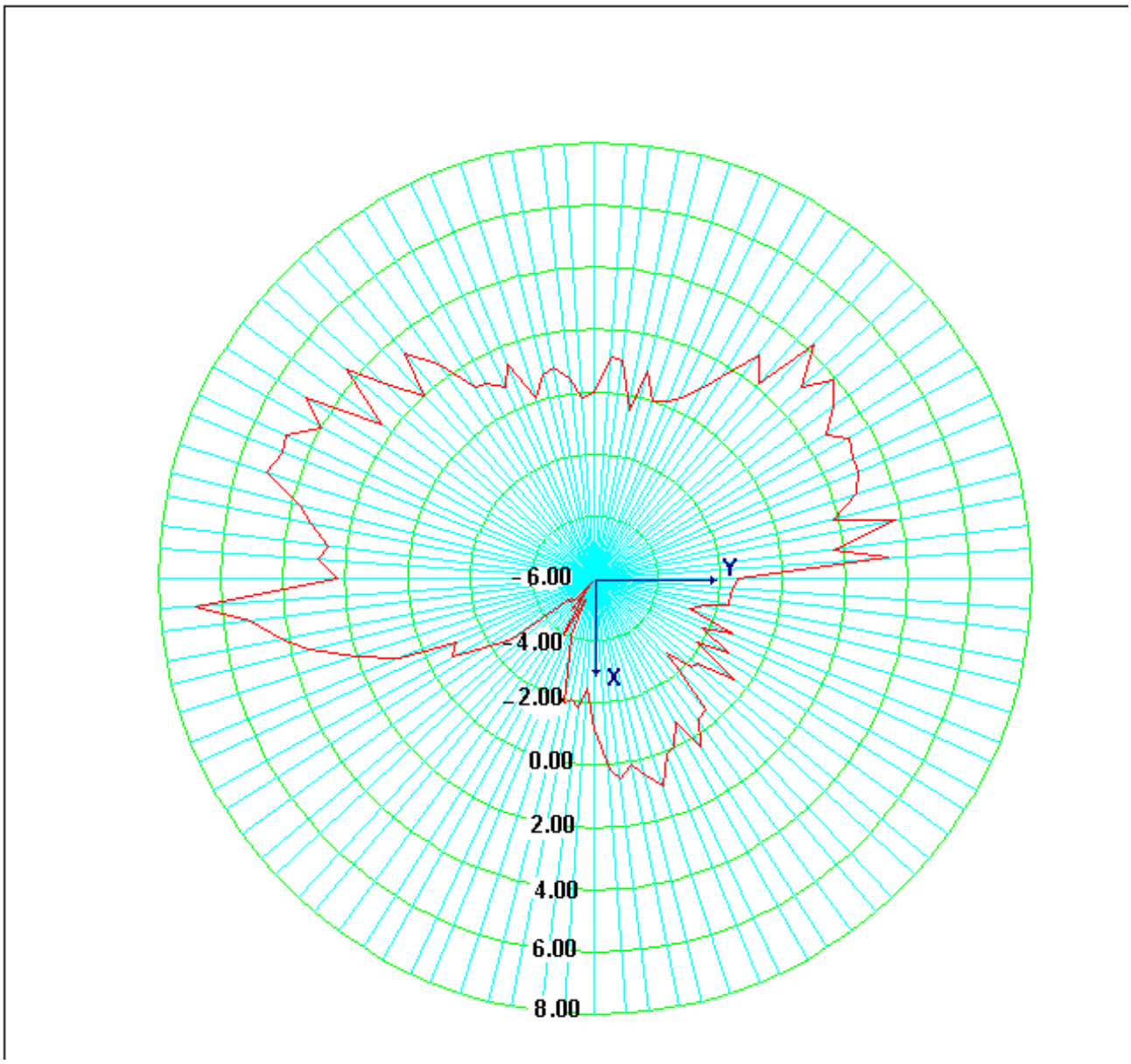
dx (µm)	2.2472937	**Max(µm)**	1.73	**Erreur de circularité(µm)**
dy (µm)	0.444297	**min(µm)**	-10.35	12.08

Diamètre moyen recalculé = 89.99978 mm ce qui est très proche de la valeur donnée par le logiciel Wtutor.

4-4-4-2-Conclusions partielles :

Le défaut de circularité calculé par Excel correspond aux erreurs d'arrondis près à la valeur donnée par le logiciel.
Le calcul est donc bien la méthode des moindres carrés.
Mais le défaut de circularité déterminé est loin d'être représentatif du défaut réel de la bague de référence.
Le graphique n°4-12 donne le défaut de circularité recalculé et montre une erreur de «triangulation » propre au type de tête de mesure utilisé.

*Le graphique n°4-11 montre l'erreur de circularité à partir des valeurs **ei** recalculées :*



graphique n°4 11 Circularité recalculée

4-4-4-3-Retrouve-t-on un défaut équivalent sur la mesure d'autres bagues de diamètres équivalents ?

Nous avons réalisé dans les mêmes conditions la mesure en 100 points de 4 bagues de diamètres 17, 25, 35 et 70 mm.

Conditions de mesure :

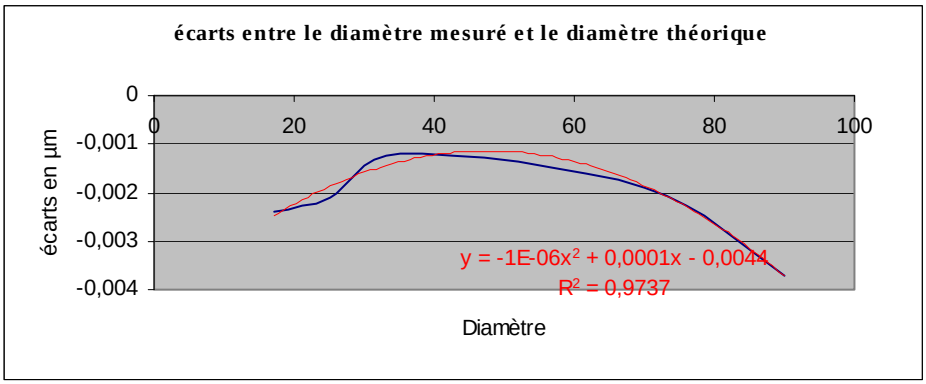
5 mesures de diamètres
longueur du palpeur 10 mm
Vitesse 20 %(1.6 m/mn)

Le tableau n°4-13 donne les valeurs obtenues sur 5 bagues de référence pour 5 mesures répétitives par diamètre :

tableau n°4 13 Mesure de bagues de 17,25,35,70,90

diamètre théorique	diamètre réel «vrai »	diamètre mesuré	écart	circularité
17	16,997	16,9946	**-0,0024**	0,0066
25	24,991	24,9889	**-0,0021**	0,0077
35	35	34,9988	**-0,0012**	0,011
70	70,004	70,0021	**-0,0019**	0,0103
90	90,0034	89,9997	**-0,0037**	0,0117
		Moyenne	**-0,00226**	0,0089

Le graphique n°4-12 montre les variations des constantes du diamètre en fonction des valeurs nominales.



graphique n°4 12 variations des constantes du diamètre en fonction des valeurs nominales.

4-4-4-4-Conclusions partielles

Les valeurs obtenues montrent une cohérence des résultats :
Un diamètre plus faible de l'ordre de 2 à 3 µm
Et un défaut de circularité entre 7 et 11 µm.
Le diamètre pourrait être corrigé d'une constante équivalente, mais on voit bien que la MMT ne peut en aucun cas remplacer un appareil spécifique de forme (contrôleur de circularité et de cylindricité).

2eme série de mesures

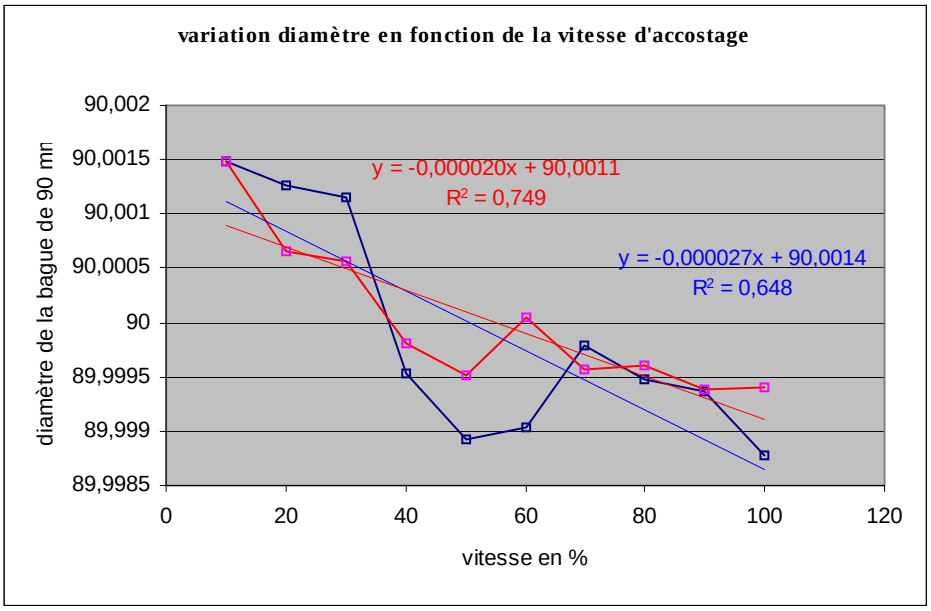
Afin de voir l'influence de la vitesse d'accostage sur le résultat, la mesure de la bague de 90 mm a été réalisée en 100 points avec des séries de 30 mesures de diamètres à des vitesses d'accostage différentes.
Procédure:
Une première mesure en 4 points sur le plan supérieur de la bague et du diamètre va nous permettre de déterminer en manuel un repère provisoire au centre de la bague.
A l'aide de la procédure évaluation d'un cercle, nous avons effectué 19 séries de 30 mesures (voir tableau n°4-14) en faisant varier la vitesse de 100 % à 10 %, et de 10 % à 100 %. (vitesse maxi 8m/mn)

tableau n°4 14 mesure d'une bague en 100 points de 90mm en fonction de la vitesse.

Vitesse en %	centre moyen de x	centre moyen de y	centre moyen de z	diamètres moyens	erreurs moyennes de circularité
100	-0,00082	0,0028	0,00016	89,99878	0,01251
90	-0,00112	0,00319	0,00016	89,99937	0,0107
80	-0,00068	0,00326	0,00016	89,99947	0,00965
70	-0,00193	0,0028	0,00016	89,99979	0,0104
60	-0,0016	0,00227	0,00066	89,99903	0,00978
50	-0,00113	0,00322	0,00016	89,99892	0,00949
40	-0,00196	0,00284	0,00066	89,99954	0,01043
30	0,00273	0,00116	0,00016	90,00116	0,01005
20	-0,00331	0,00253	0,00016	90,00126	0,01064
10	0,00163	-0,00048	0,00016	90,00148	0,00936
20	-0,00324	0,00227	0,00016	90,00066	0,00908
30	0,00211	0,00024	0,00016	90,00056	0,01007
40	0,00171	-0,0013	0,00016	89,99981	0,0097
50	0,00114	-0,00113	0,00066	89,99951	0,00982
60	0,00034	0,00117	0,00016	90,00004	0,00892
70	-0,00024	0,00108	0,00016	89,99957	0,00804
80	-0,00039	0,00125	0,00066	89,9996	0,00978
90	-0,00019	0,00183	0,00066	89,99938	0,0099
100	-0,00055	0,00203	0,00016	89,99941	0,01051
moyenne	**-0.00039474**	**0,00163316**	**0,00029158**	**89,99986**	**0,009938421**
Ecart type	**0.00169534**	**0,00143596**	**0,00022017**	**0,00079529**	**0,000901106**

Analyse :

La variation des diamètres montre bien l'influence de la vitesse d'accostage.
Le diamètre varie de 89.99878mm à 90.00148mm.
Dans l'autre sens, la variation varie de 90.00148 mm à 89.99941mm.
Les vitesses dans une première analyse sont en diminution et dans la deuxième en augmentation pour faire apparaître une erreur de reversibilité.
Le graphique n°4-13 montre l'évolution des diamètres en fonction de la vitesse.



graphique n°4 13 évolution des diamètres en fonction de la vitesse

L'évolution peut être considérée comme linéaire, mais le graphique n°4-2-14 fait apparaître une erreur de reversiblité 0.63 micromètres pour la vitesse 100 % et 1 micromètre pour la vitesse 60 %.
On prendra par la suite l'équation moyenne pour le calcul de l'incertitude :

$$y = -0.0000235x + 90.00125$$

On retrouve une erreur systématique par rapport à la valeur supposée ''vraie'' de la bague donnée par l'étalonnage (90.0034) de 2,1micromètres à 5 micromètres pour les vitesses maximums.
D'où l'importance de la vitesse.

Question importante : Pourquoi cette constante d'erreur sur la valeur du diamètre et surtout sur le défaut de circularité affiché.
La constante d'erreur sur le diamètre est significative mais ce qui nous inquiète le plus c'est la valeur affichée pour l'erreur de circularité.
Le défaut de circularité varie de 9 à 12 micromètres.

Plusieurs hypothèses :

2) Défaut de triangulation de la tête de mesure.

- Incertitudes cumulées au point (p) (figure n°4-6) à chaque prise de point et aux erreurs d'asservissement de la machine.
- Effet combiné de la flexion du stylet et de sa longueur.

C'est doute un peu tout cela en même temps, mais dans l'état actuel de la technique des palpeurs dynamiques c'est un paramètre important dans la mesure des défauts de forme que nous devons quantifier comme constante d'erreur.

1ere conclusion :

Les résultats d'une machine à mesurer sont tributaires de la vitesse d'accostage, mais surtout le défaut de forme affiché n'est pas représentatif de la réalité.

Les écarts type sur x, y, z restent dans des valeurs équivalentes aux valeurs à celle déjà entrevues pour la mesure de la sphère en qualification.

Par la suite, nous allons proposer une nouvelle méthode de qualification afin de mieux déterminer la vraie valeur du rayon dynamique de la bille de palpage.

Mais nous n'avons actuellement aucune solution pour minimiser le défaut de circularité.

Il serait peut être possible de corriger les valeurs obtenues pour chaques points palpés, par logiciel si on connaît les défauts propres de chaque tête de mesure utilisée.

Autre question que l'on peut se poser :

Quel est le nombre de points minimum pour la mesure de la circularité :

Toutes nos mesures de la première série ont été des mesures en 100 points.

Il est bien évident que l'on ne réalise jamais de mesures de cercle en 100 points (ou très rarement).

La question qui se pose est donc :

Quel est le nombre de points minimum pour la mesure d'un cercle ?

Afin de voir l'influence du nombre de points sur le résultat, la mesure de la même bague a été réalisée en 100 points avec un programme spécifique donnant un accostage normal à la matière.

Conditions de mesure :

Palpeur longueur 10mm

Diamètre de la bille 4mm

Vitesse 20% (1.6 m/mn)

Nombre de points variant de 4 à 100 points.

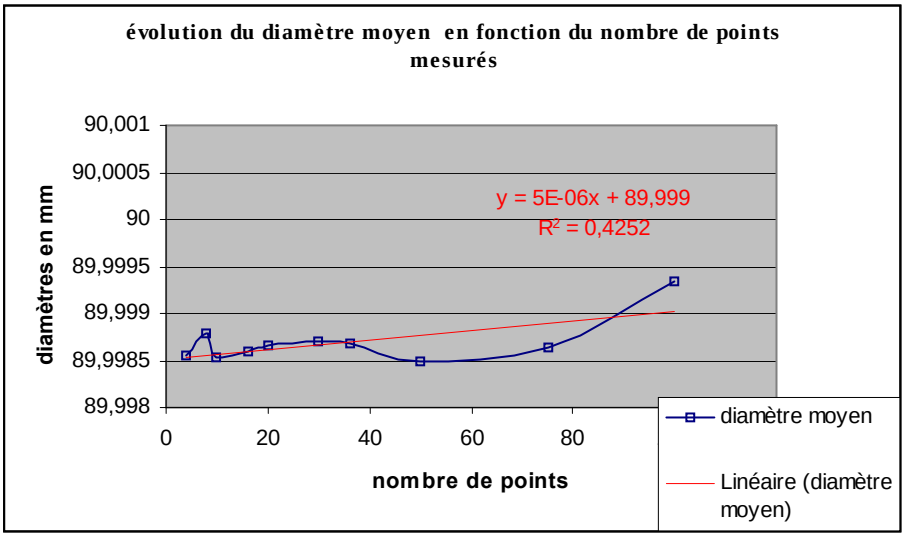
30 mesures pour chaque palier de nombres de points.

tableau n°4 15 Evolution des critères en fonction du nombre de points

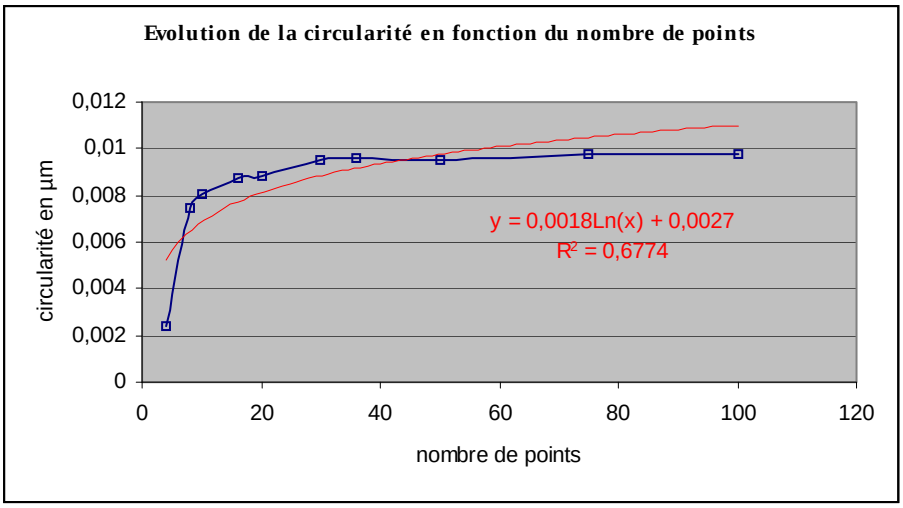
nombre de points	diamètre moyen	Erreur de circularité	Centre x=	Centre y=	Centre z=	Ecart type sur chaque série de 30 mesures
4	89,99856	0,002417	-0,000736	0,000466	0,000446	0,00049
8	89,99878	0,007417	-0,002725	0,001586	0,000363	0,00034
10	89,99854	0,008062	-0,003011	0,000676	0,000596	0,00027
16	89,9986	0,008728	-0,002831	0,000759	0,000596	0,00028
20	89,99865	0,008826	-0,005699	0,002059	0,000236	0,0002
30	89,9987	0,00955	-0,003525	0,00082	0,000203	0,00026
36	89,99868	0,009629	-0,001542	-0,00069	0,00017	0,00024
50	89,99848	0,00953	-0,005822	0,001729	0,00042	0,00022
75	89,99864	0,00977	-0,005253	0,00636	0,000386	0,00016
100	89,99935	0,009775	-0.003457	-0,001583	0,000228	0,0003
moyenne	**89,9986255**	**0,00821433**	**-0,00346044**	**0,00152944**	**0,00037955**	**0,00027333**
écarts type	**0,00024471**	**0,00223692**	**0,00180442**	**0,00211498**	**0,00015507**	

Analyse :

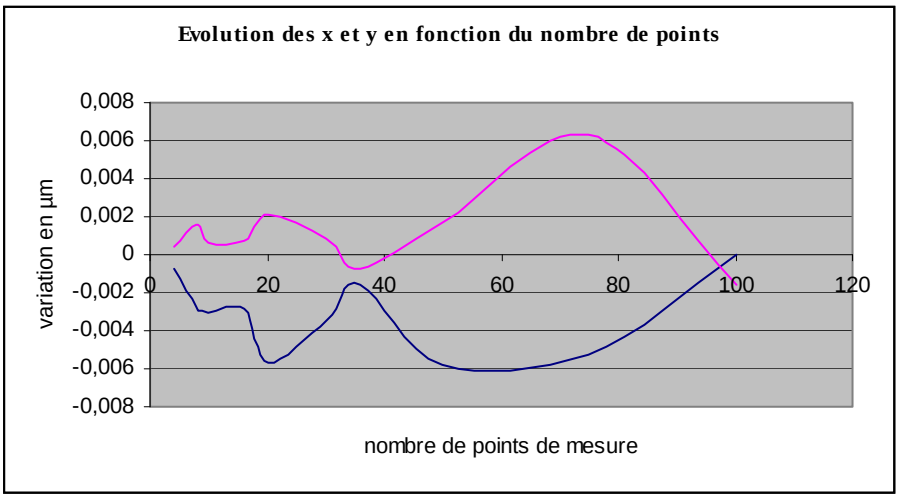
Les résultats sont cohérents au point de vue diamètre avec le tableau 4-13.
Les écarts type sont plus resserrés du fait du plus grand nombre de mesures.
La valeur de l'erreur de circularité est confirmée (environ 10 micromètres).



graphique n°4 14 Evolution du diamètre de 4 à 100 points



graphique n°4 15 évolution de la circularité en fonction du nombre de points



graphique n°4 16 Evolution du centre X, Y

4-4-4-5-Conclusions générales du paragraphe n° 4-4-4

Le nombre minimum de points pour la mesure d'un diamètre est situé entre 10 et 16 points.
Même constatation sur la valeur de la circularité (entre 10 et 16 points).
Mais il reste une grande incertitude sur la valeur réelle de cette circularité (11 à 13 micromètres de constante minimale).
Cela confirme que pour une meilleure approche du défaut de circularité, il est préférable d'utiliser des appareils spécifiques de contrôle de forme quand cela est possible.
Les constructeurs de têtes de mesure devraient travailler à une amélioration des capteurs par une diminution de l'effet de triangulation.
Par contre les valeurs des coordonnées restent stables et ne sont pas influencées par le nombre de mesures.
Ce qui donne les incertitudes globales Ig en fonction du tableau 4-14

Incertitude sur la circularité

Ig sur Δc = (0.010±0.0018)mm **avec k=2**

Incertitude sur le diamètre

Ig sur ϕ=racine((0.00226/3)²+(0.0000235*vitesse en %))=±0.00278)mm avec k=2

Incertitude sur les coordonnées du centre

Is sur les coordonnées du centre :

$$Is = \sqrt{(0.00169)^2 + (0.00143)^2 + (0.00022)^2} = 0.0023$$

Is = ± 0.0046 mm avec k=2.

Ig (coord)= (±0.0046)mm avec k =2

Important:
On voit bien que la constante d'erreur sur le diamètre est trop importante dans le cas de mesure précises.
Une capabilité de 4 (préconisée par la plupart des grands donneurs d'ordre) n'est pas réalisable avec un intervalle de tolérance de l'ordre du centième de millimètre.
Le rayon dynamique est déterminé à partir de la valeur du diamètre de la sphère de référence utilisée pour la qualification des palpeurs.
Il faut donc obligatoirement connaître la valeur de ce diamètre avec une incertitude la plus faible possible en faisant mesurer celle ci par un organisme accrédité par le Bureau National de Métrologie.

Remarque:
La procédure d'étalonnage de ces sphères de référence doit être une mesure sans contact ou avec des efforts de mesure inférieurs à 0.1 ou 0.2 N, afin de minimiser les déformations dues aux efforts de mesure.
D'autre part, ces sphères de référence doivent être réalisées avec beaucoup de soins et délivrées avec un certificat de mesure comprenant le diamètre moyen et l'erreur de sphèricité.
Ce n'est pas toujours le cas actuellement.

4-4-4-6- Une nouvelle procédure de qualification du rayon dynamique de la bille de palpage.

Dans le cas de mesures précises, la qualification par la méthode classique sur une sphère n'est pas suffisante.
Nous avons vu que la constante de correction varie entre 3 et 5 micromètres.
La procédure de qualification doit se faire en deux temps :
Qualification en 5 points ou 9 points sur une sphère de référence étalonnée par un établissement accrédité par une mesure sans contact (nappe laser) ou sur un banc de mesure horizontal dont les efforts de mesure sont limités au maximum (0.1 à 0.2 N) équipé d'un appareil à comptage de franges (interféromètre laser).
Mesure d'une bague de référence étalonnée en 16 à 20 points pour déterminer le diamètre moyen (5 diamètres successifs)
Déterminer de la constante d'erreur par différence entre le diamètre «vrai » de la bague et le diamètre obtenu (moyenne des 5 mesures).
Corriger le rayon dynamique en conséquence.

1 ère Application:
Mesure d'une bague SIP d'étalonnage de banc horizontal de diamètre théorique de 40 mm en 16 points avec un palpeur de 10 mm, de rayon 2 mm et une vitesse d'accostage de 20% (1.6 m/mn).
Diamètre théorique de la bague 39.9992.
La correction du rayon dynamique doit être de :
$C= -1^{E}\text{-}06x^2+0.00009x-0.0044$ (graphique n°4-12) **soit 0.8 µm au diamètre**
Résultats des 30 mesures de la bague en 100 points mesure :
Palpeur diamètre 4 mm
Vitesse accostage 20 % (0.8m/mn)
Nombre de points par mesures 20 :

tableau n°4 16 Mesure bague 40 avec correction rayon dynamique

	x=	y=	z=	diamètre	circularité
moyenne	-0,00281	0,00099	0,00091	**39.99903**	0,00642
écart type	0,00065847	0,00262486	0,00012685	0,00020246	0,00051758

Ecart entre le diamètre théorique et le diamètre réel obtenu :
0.00017 mm

Le nouvel Ig devient :
Incertitude sur le diamètre de la bague avec k=2

Ig=0.00017±0.0004 mm

2 ème application
Mesure de la bague de 90 mm :
Résultats de 30 mesures en 100 points
Palpeur 4 mm
Vitesse d'accostage 20 % (0,8m/mn)
Diamètre réel de la bague : 90.0034
Valeurs mesurées sans correction : 89.99935
La correction du rayon dynamique doit être de :
C= -1^{E}-06x²+0.00009x-0.0044 (graphique n°4-12) **soit 3.7 µm au diamètre**
Valeur mesurée après correction du rayon dynamique :

tableau n°4 17 mesure bague 90 après correction du rayon dynamique

	x=	y=	z=	diamètre	circularité
Moyennes =	-0,002752	0,001671	0,00024667	**90.0038**	0,01091
écart types =	0,00039755	0,00030566	9,1287E-05	0,00020296	0,00146891

Ecart entre le diamètre théorique et le diamètre réel obtenu :
0.0004 mm
Ce qui confirme l'incertitude de **Ig=0.00017±0.0004 mm**

4-4-4-7-Conclusions particulières sur le chapitre 4-4-4

La qualification du palpeur sur une bague de référence permettra d'améliorer la justesse des mesures des diamètres de tolérance resserrées.
Dans les mesures normales l'incertitude Ig est celle donnée au paragraphe conclusions du paragraphe n°4-4-4

5éme élément de base : la sphère

4-5-1 mesure de la sphère

Nous allons maintenant déterminer les incertitudes de mesure sur un élément de base qui est une sphère.
Les incertitudes de mesure d'une sphère dépendent d'une part de tous les paramètres déjà étudiés :

- longueur du palpeur
- vitesse d'accostage
- angle d'accostage
- diamètre de la bille.

Ces différents paramètres seront déduits des mesures déjà effectuées.
Mais le calcul de la sphéricité dépend aussi en partie du nombre de points pris en compte dans le calcul.
Nous allons étudier l'influence du nombre de points minimum pour obtenir un résultat significatif.

4-5-2- Procédure

Les procédures de mesure sont définies ci-après .

4-5-3- Objectifs

L'introduction du paragraphe 4-2-2 page 139 reste valable, la mesure d'une sphère pose les mêmes questions :
Quel le nombre de points significatif dans la mesure d'une sphère ?

4-5-4- principe de mesure d'une sphère *:*

Pour terminer la mesure des éléments de base, après la mesure d'un point, d'une droite, d'un plan et d'un cercle, nous avons effectué la mesure d'une sphère.
La méthode de traitement des résultats est là aussi la méthode des moindres carrés.
Dans la procédure donnée par la machine, les résultats sont :

- Les coordonnées du centre de la sphère. (x , y, z).
- Le diamètre moyen.
- Le défaut de sphéricité.

Les résultats obtenus sont comparés aux différentes tolérances imposées par le bureau d'études et on déclare la pièce valide ou non.

La procédure de mesure d'une sphère préconisée par le logiciel Wtutor donne un point au pôle et les autres à l'équateur.

Afin de mieux répartir les différents points sur toute l'enveloppe sphérique, nous avons réalisé un programme spécifique identique à celui de la mesure en qualification en 9 points de la sphère de référence (chapitre 3-4-1). Figure n°4-8
Ce programme (annexe F) fera varier le nombre de points de mesure sur la partie supérieure de la calotte sphérique de 9 à 91 points.

4-5-4-1- Influence du nombre de points :

Conditions de mesure :
Palpeur de 4 mm de diamètre
Longueur 10 mm
Vitesse d'accostage 20%(1.6m/mn).
Accostage normal à la matière.
Diamètre "réel" étalonné par **l'Institut Méditerranéen de la Qualité 29.3686 mm**
Ces étalonnages ont été réalisés sur un banc horizontal de mesure (1) et sur un appareil de mesure par nappe laser (2).
Les résultats entre les 2 procédures(1) et (2) se recoupent à 0.0002µm près.

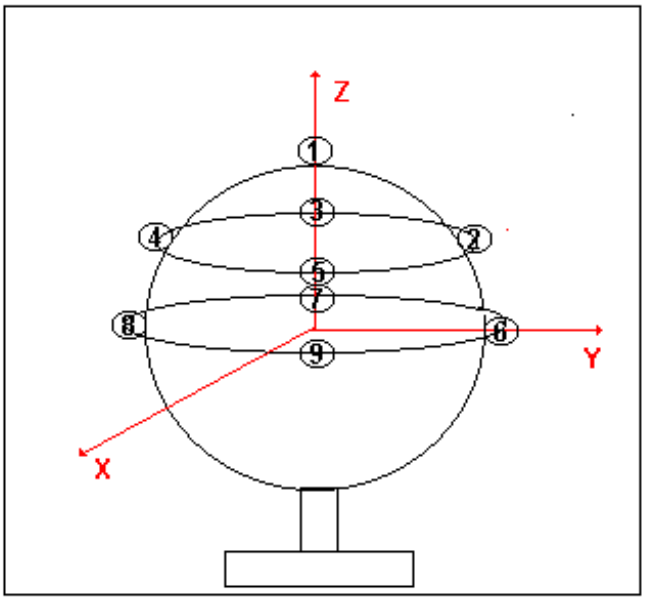


fig n°4 7 Mesure d'une sphère en n points

Les tableaux n°4-18 et n°4-19 donnent les variations des différents paramètres en fonction du nombre de points de mesure.

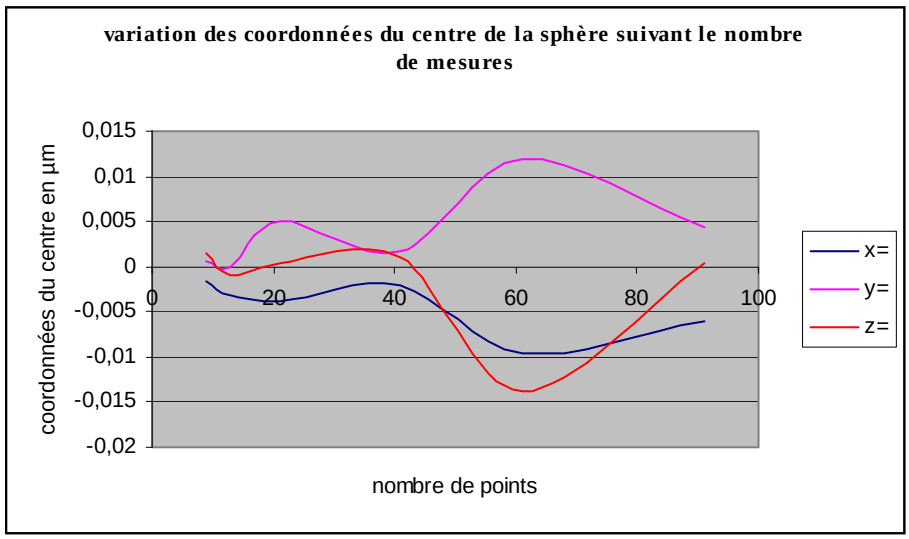
tableau n°4 18 différents paramètres en fonction du nombre de points de mesure.

nombre de points	x=	y=	z=	diamètre	sphéricité
9	-0,00152287	0,00069767	0,001481	29,3653907	0,00219633
13	-0,00310667	-0,000025	-0,00088633	29,3650467	0,00601
21	-0,003876	0,0049967	0,00045233	29,3654297	0,00599733
41	-0,00205533	0,00181433	0,00101467	29,3651903	0,007468
61	-0,009601	0,01194567	-0,0138	29,3655473	0,00808533
91	-0,00611167	0,00446467	0,000471	29,365553	0,008564
moyenne	**-0,00438**	**0,00398**	**-0,00188**	**29,36536**	**0,00639**

tableau n°4 19 écarts type en fonction du nombre de points de mesure.

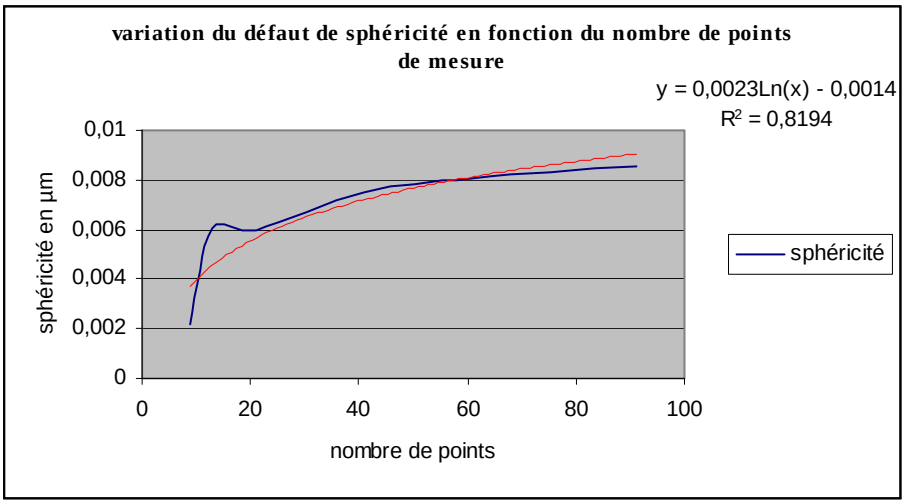
	écart type x=	écart type y=	écart type z=	écart type diamètre =	écart type sphéricité
9	0,00036832	0,00043975	0,00063789	0,00072797	0,00044354
13	0,00030209	0,00056044	0,00113318	0,00044309	0,00056145
21	0,00044311	0,00045838	0,00067497	0,00052551	0,00050651
41	0,00103374	0,00076345	0,00074741	0,00045238	0,00071079
61	0,00044255	0,00051161	0,00091642	0,00030612	0,00045595
91	0,00198332	0,00337117	0,00094568	0,0002993	0,0047274
moyenne	**0,00076219**	**0,00101747**	**0,00084259**	**0,00045906**	**0,00052516**

Les graphiques qui suivent montrent les évolutions des différents paramètres x, y, z, diamètres et sphéricité



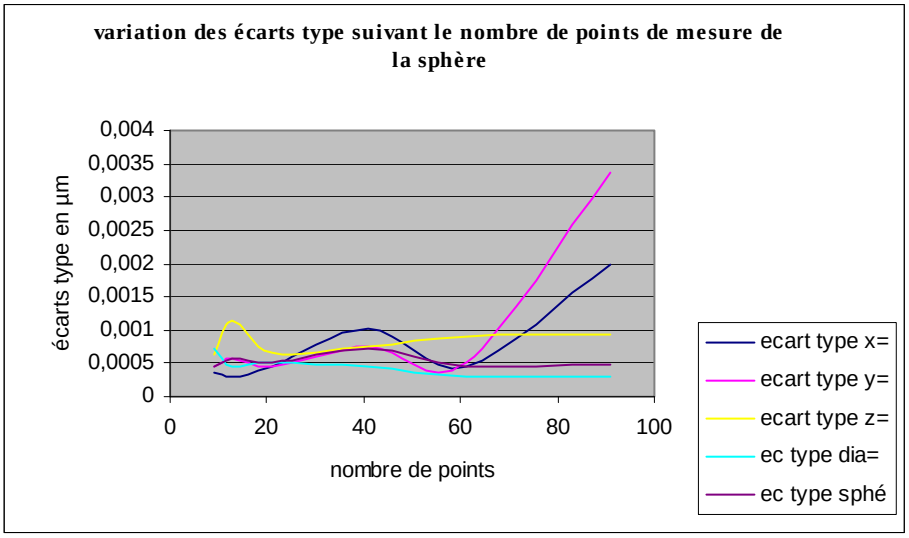
graphique n°4 17 Variation des coordonnées du centre de la sphère x, y, z en fonction du nombre de points.

graphique n°4 18 Variation du diamètre de la sphère



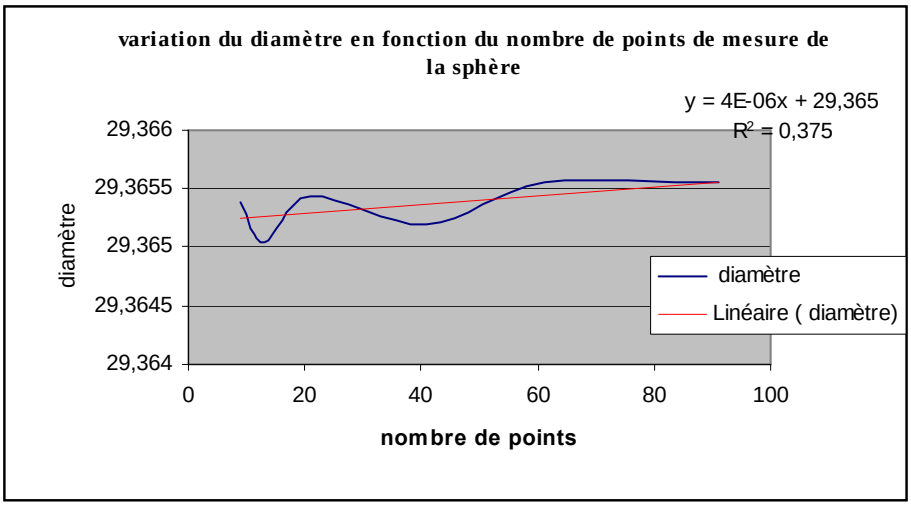
graphique n°4 19 ***Variation du défaut de sphéricité en fonction du nombre de points***

On retrouve dans le défaut de forme du graphique n°4-17 quasiment le même graphe que le paragraphe sur le cercle



Graphique n°4-19 bis évolution des écarts type en fonction du nombre de points

Les variations des écarts type montre que l'évolution est sensible quand le nombre de points



augmente. (Surtout au-delà de 60 points et pour uniquement x et y, mais il est très rare d'effectuer autant de points sur une sphère).
Pour les autres paramètres les valeurs restent stables.
Nous travaillerons donc avec une moyenne des écarts type comme l'indique le tableau n°4-19.
Conclusions partielles
Les variations sur le diamètre sont peu influencées par le nombre de points.
L'équation linéaire est de 4^{E}-06x+29.365 donne une variation entre 23.36508 en 21 points et 23.3655 en 91 points. Nous prendrons la moyenne à 23.36536 (tableau n°4-2-19)

La constante d'erreur est de :

Cte= 29.3686- 29.36536 = 0.00324 mm sur le diamètre.

Ce résultat pourrait être corrigé par la même méthode que le chapitre précédent en mesurant plusieurs sphères de diamètres différents afin de tirer la fonction de correction du rayon dynamique du capteur.
Le défaut de sphéricité est la aussi entaché d'une erreur peu compatible avec une mesure de forme (idem paragraphe 4-3-4-2-1 sur la mesure d'une bague).
La position du centre de la sphère comporte une variation importante des trois composantes x, y, z (surtout pour un nombre de points supérieur à 60).

Récapitulatif (valeurs en µm) :
k=2

Diamètre *:*
Ig(ϕ)= 0.0032 ± 0.00092mm

Coordonnées du centre *:*

Is(s)= Incertitude type sur le centre de la sphère

$$Is(s) = \sqrt{(0.00076)^2 + (0.0011)^2 + (0.00084)^2} = 0.0016$$

Ig(coord)=± 0.0032mm

Défaut de sphéricité :

Ig(sphéricité)=0.0064±0.001 mm

4-5-4-2- Influence de la vitesse.

Le tableau n°4-18 et le graphique n°4-18 nous montre que les valeurs du diamètre sont stables au-delà de 20 mesures.
Nous avons donc procédé à une analyse de l'influence de la vitesse d'accostage dans les conditions de mesure suivantes :
Conditions de mesure :
Palpeur de 4 mm de diamètre
Longueur 10 mm

Vitesse d'accostage variant de 10 à 100% (de 0.8 à 8m / mn).
Accostage normal à la matière.

Diamètre "réel" étalonné par **l'Institut Méditerranéen de la Qualité 29.3686 mm .**

Les tableaux n°4-18 et n°4-19 donnent les variations des différents paramètres en fonction du nombre de points de mesure.

Les graphiques qui suivent montre les évolutions des différents paramètres x, y, z, diamètres et sphéricité

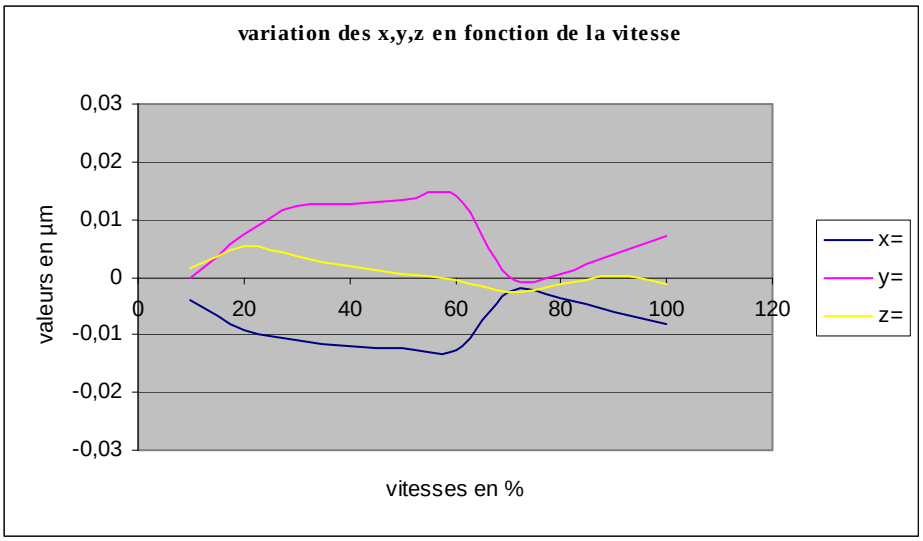
tableau n°4 20 Influence de la vitesse sur les différents paramètres

vitesses %	x=	y=	z=	diamètre	sphéricité
10	-0,00397767	-0,00016067	0,00150267	29,3656437	0,00539267
20	-0,00903667	0,00753833	0,00528333	29,366216	0,00603733
30	-0,011097	0,012238	0,00376767	29,367732	0,00618633
40	-0,01198333	0,01262867	0,00201467	29,370714	0,00812333
50	-0,01226333	0,01337333	0,00039667	29,3733201	0,00472333
60	-0,01259533	0,014069	-0,00068067	29,3737947	0,00354367
70	-0,00246167	0,00014067	-0,002755	29,3743123	0,003597
80	-0,00380067	0,00063267	-0,001377	29,3741007	0,00317733
90	-0,00599133	0,00407067	0,00026733	29,373917	0,00041967
100	-0,00819067	0,00726833	-0,00127633	29,373575	0,00362467
moyenne					**0,00448253**

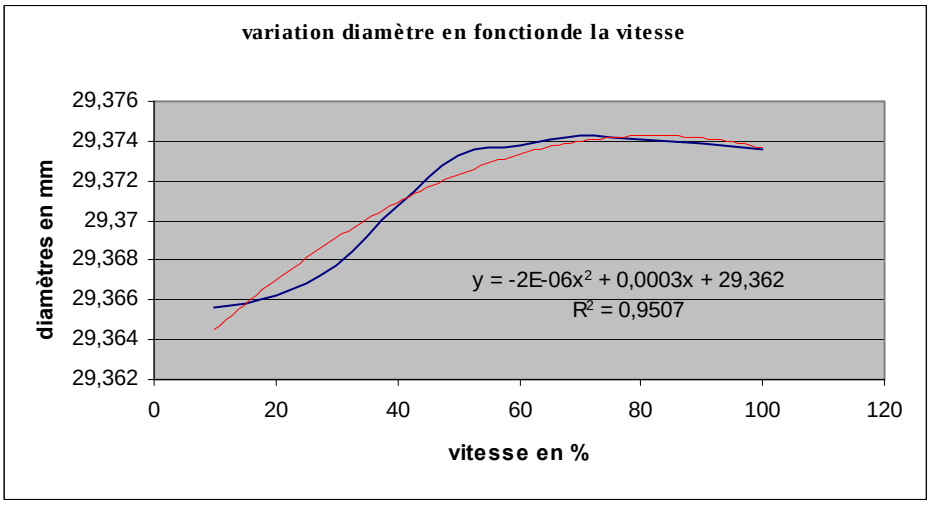
tableau n°4 21 Influence de la vitesse sur les écarts type

vitesses %	écart type x=	écart type y=	écart type z=	écart type diamètre	écart type sphéricité
10	0,00044446	0,0005325	0,00071586	0,00071586	0,00066913
20	0,00044255	0,00045838	0,00067497	0,00052551	0,00050651
30	0,0004005	0,00028534	0,00133623	0,00060789	0,0010291
40	0,00023898	0,00028596	0,00098547	0,00035647	0,00051465
50	0,00035383	0,0003762	0,00104184	0,00044353	0,00104212
60	0,000166	0,00029082	0,00113182	0,00023369	0,000488
70	0,00032093	0,00063152	0,00046774	0,00026218	0,000386
80	0,0005389	0,00069775	0,00055161	0,00020902	0,00033889
90	0,0007536	0,00111049	0,0004395	0,00021192	0,00041967
100	0,00030825	0,00063615	0,00055783	0,00025953	0,00037396
moyenne	**0,0003968**	**0,00053051**	**0,00079029**	**0,00038256**	**0,0005768**

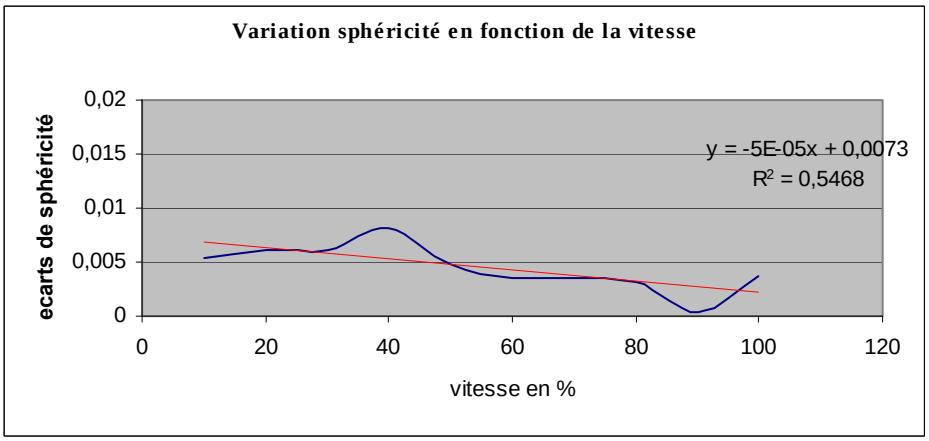
Les graphiques qui suivent montrent les évolutions des différents paramètres.



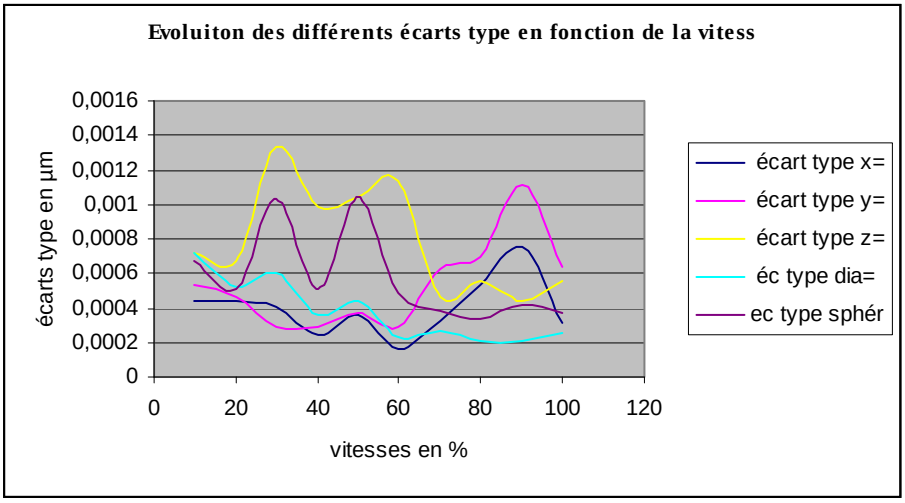
graphique n°4 20 évolution du centre en x, y ,z en fonction de la vitesse.



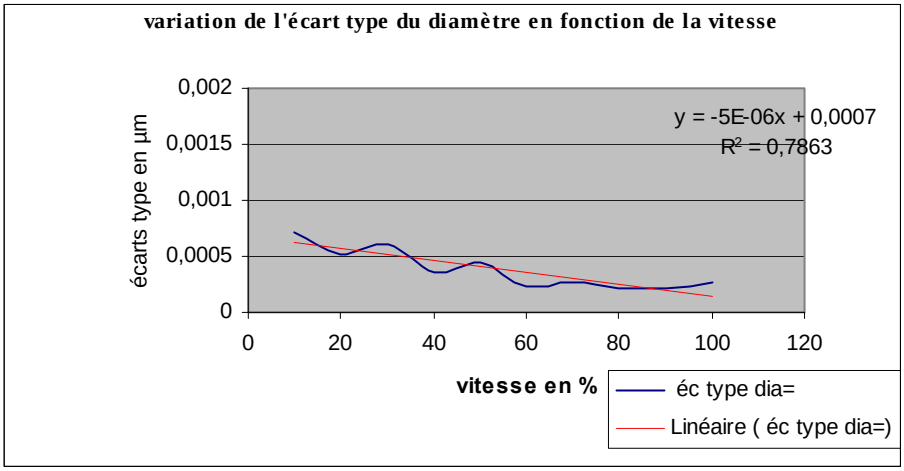
graphique n°4 21 Evolution du diamètre en fonction de la vitesse.



graphique n°4 22 Evolution de la sphèricité en fonction de la vitesse.



graphique n°4 23 Evolution des écarts type en fonction de la vitesse.



graphique n°4 24 évolution de l'écart type en fonction de la vitesse

Conclusions:

Les différents de la vitesse (graphiques des numéros n°4-20 à n°4-24) montrent que les variations sur les écarts type sont équivalentes aux variations enregistrées sur la variation du nombre de points avec toutefois une variation sur le diamètre qui semble se stabiliser au-delà d'une vitesse à 50 %.

La constante d'erreur à vitesse 10 % (0.8 m/ mn) est de :

Cte= 29.3686- 29.36564 = 0.00329 mm sur le diamètre.

Mais ce résultat ne peut être corrigé par la même méthode que le chapitre 4-4-4 car la vitesse joue un rôle important dans le résultat final.

Le défaut de sphéricité est la aussi entaché d'une erreur similaire avec les résultats précédents qui sont peu compatibles avec une mesure de forme (idem paragraphe 4-4-4-4- sur la mesure d'une bague).
La position du centre de la sphère comporte une variation importante des trois composantes x, y, z du même ordre que les valeurs précédentes.

Récapitulatif (valeurs en µm) :
k=2
Diamètre :
Ig(ϕ)= 0.0032 ± 0.00091mm

Coordonnées du centre :

Is(s)= Incertitude type sur les coordonnées moyennes du centre de la sphère(tableaux n°4-2-19.

$$Is(s) = \sqrt{(0.00076)^2 + (0.00011)^2 + (0.00084)^2} = 0.0016$$

Ig(coord)=± 0.0032mm (avec k=2)

Sphéricité :

Ig(sphéricité)=0.0045 ± 0.0011 mm

Equations finales en fonction du nombre de points mesurés et de la vitesse :
En regroupant les résultats du tableau n°4-22 on peut déterminer les variations des diamètres en fonction des vitesses.

tableau n°4 22 variations des diamètres en fonction des vitesses

Nbre points	10 %	20	30	40	50	60	70	80	90	100
9	29,36504	29,36504	29,3692	29,3708	29,372	29,3728	29,3732	29,3732	29,3728	29,372
13	29,36509	29,36515	29,36932	29,370917	29,372117	29,372917	29,37332	29,373317	29,37292	29,372117
21	29,36517	29,36527	29,36943	29,371035	29,372235	29,373035	29,37343	29,373435	29,37303	29,372235
41	29,36534	29,36539	29,36955	29,371152	29,372352	29,373152	29,37355	29,373552	29,37315	29,372352
61	29,36558	29,36551	29,36967	29,37127	29,37247	29,37327	29,37367	29,37367	29,37327	29,37247
90	29,36594	29,36562	29,36979	29,371387	29,372587	29,373387	29,37379	29,373787	29,37339	29,372587

Le nombre de points de mesure sur une sphère n'a que peu d'influence sur le résultat par rapport à la vitesse qui fait évoluer le diamètre de 29.365 à 29.374
Le graphique n°4-25 donne l'équation finale de l'évolution des diamètres de la sphère en fonction principalement de la vitesse

Equation générale de la variation du diamètre en fonction de la vitesse en % : (graphique n°4-1-73

$$y = -8.42E-09x^3 - 7.05E-07x^2 - 0.00002507x + 29.36239$$

Application:
Incertitude pour une sphère de 29.369 mm mesurée en 41 points à une vitesse de 60 % (soit 4.8 m / mn).
On obtient :

tableau n°4 23 incertitude sur une sphère de 29.369

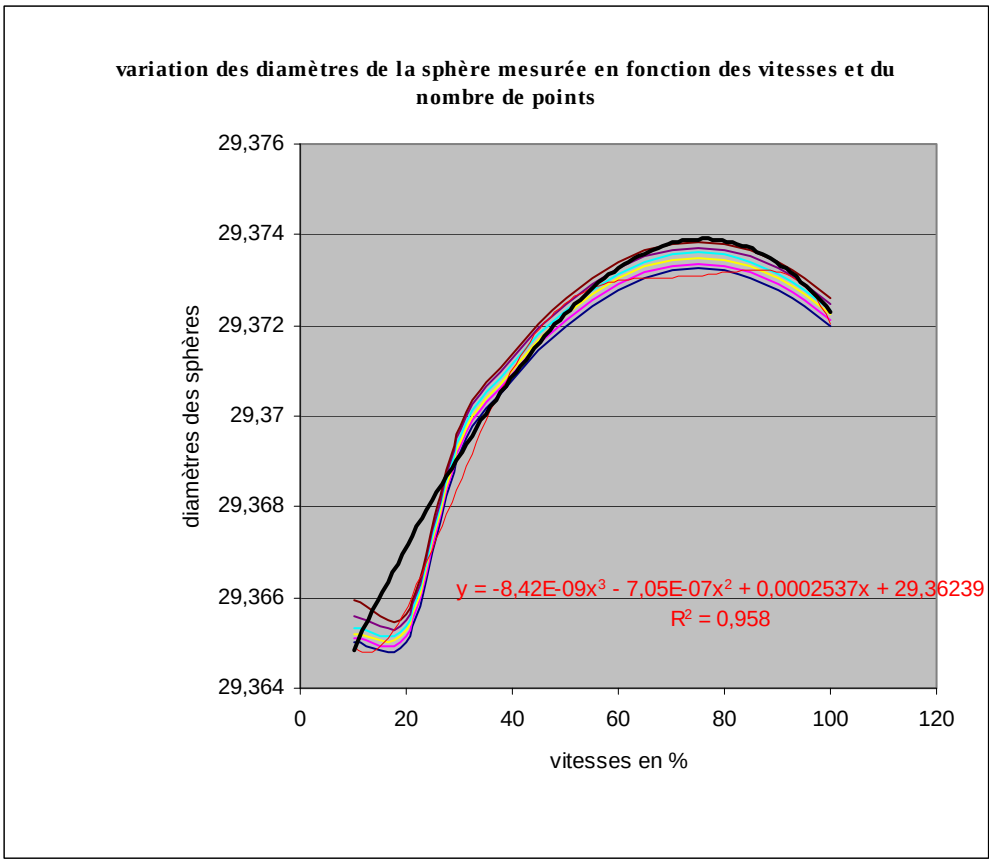
vitesses	diamètre	écart	Incertitude en µm (Is)
10	**29,364848**	**-0,0038**	**±0.0008**
20	**29,367115**	**-0,0015**	**±0.0008**
30	**29,36914**	**0,00054**	**±0.0008**
40	**29,370872**	**0,00227**	**±0.0008**
50	**29,372262**	**0,00366**	**±0.0008**
60	**29,373257**	**0,00466**	**±0.0008**
70	**29,373809**	**0,00521**	**±0.0008**
80	**29,373865**	**0,00527**	**±0.0008**
90	**29,373377**	**0,00478**	**±0.0008**
100	**29,372293**	**0,00369**	**±0.0008**

Soit une incertitude Ig sur le diamètre avec k=2

Ig(ϕ)= 0.00466 ± 0.0016 mm

Ig (sphéricité))= 0.0045 ± 0.0011 mm

Ig(coord)= ± 0.0022 mm



graphique n°4 25 variation du diamètres de la sphère en fonction de la vitesse et du nombre de points

Nota:

Le tableau permettrait d'effectuer des corrections en fonction des paliers de diamètres des sphères mesurées.
Il faudrait pour cela posséder une série de sphères de références de diamètres différents connus de manière à déterminer l'équation de correction comme nous l'avons vu dans le paragraphe sur le cercle.

4-6-1-Tableau récapitulatif des incertitudes sur les mesures d'éléments(vitesse 1.6m/mn)

Le tableau n°4-24 donne les incertitudes globales avec k=2 pour les cinq éléments étudiés. Ces valeurs sont estimées avec des vitesses minimisées à 1.6 m/mn.

tableau n°4 24 incertitudes globales

Type d'élément mesuré	Incertitude Ig
Point	**±0.00052 mm**
Droite	
Rectitude	**0.0025±0.00054mm**
Plan	
Planéité	**0.0035±0.00052mm**
Cercle	
Diamètre	**0.00238±0.00158mm**
Circularité	**0.010±0.0018mm**
Coordonnées du centre	**±0.0046mm**
Sphère	
Diamètre	**-0.0015±0.0016mm**
Sphéricité	**0.0045±0.0011mm**
Coordonnées du centre	**±0.0022mm**

Ce tableau sera repris dans le chapitre suivant , ou nous allons faire une proposition d'un modèle de calcul des incertitudes et des capabilités qui pourraient être intégrés dans les logiciels de mesure ou de gestion des appareils tenant compte des différents paramètres que nous venons d'étudier.

4-7-1-mesure d'une pièce test:

4-7-1-1-Introduction :

Toutes les expérimentations et les calculs ont été réalisés sur notre machine avec des conditions qui nous sont propres .

- Logiciel de correction de justesse
- Environnement
- Ancienneté de la machine
- Logiciel d'exploitation
- Etc. ...

Il nous paraissait important de situer notre machine par rapport à un parc plus complet représentatif .
Notre choix s'est porté sur les résultats d'une intercomparaison organisée par le Bureau National de Métrologie en France.
Cette intercomparaison a porté sur la mesure d'une pièce test qui a circulé dans différents laboratoires industriels .

4-7-2 Objectifs :

Situer les performances de notre machine par rapport à l'ensemble du panel des machines servant à une analyse globale des possibilités des MMT .

4-7-2-1-Comment situer la machine utilisée par rapport au parc actuel.

Afin de pouvoir déterminer la précision relative de la machine utilisée par rapport à un panel représentatif des machines utilisées en France, j'ai mesuré une pièce test utilisée en 1992 **[7]** dans une campagne d'intercomparaison sur 27 machines.
Composition du parc :

Machine de métrologie à tête mesurante groupe (1)	**6**
Machine à tête dynamique groupe (2)	**21**

Notre machine fait partie du groupe (2).

Conditions de mesure :
Palpeur de diamètre 5 mm
Longueur 50mm
Corps en matériau composite
Vitesse de mesure 1.6 m/mn
Qualification en 5 points sur une sphère de 18.875 mm
3 mesures répétitives après une remise en position entre chaque série de mesures.

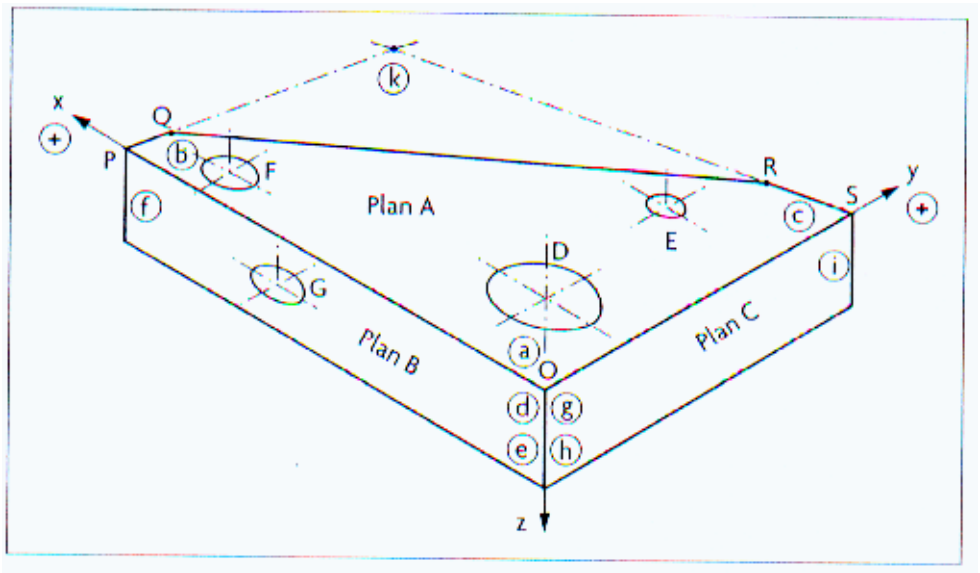


fig n°4 8 La pièce test

Les mesures se sont portées principalement sur les diamètres, les entre-axes et la mesure des angles.
Le tableau des résultats est donné par le tableau n°4-25

élements	X"vrai"	y"vrai"	écart x	écart y	Etendue x	Etendue y	éc type x	ec type y
coord 14 (D)	45,9927	49,997	0,0013	-0,0009	0,009	0,013	0,0026	0.0027
coord 13(E)	122,987	60,9997	0,0010	-0,0072	0,024	0,013	0,0044	0,0028
coord 12(F)	190,008	20,0175	-0,0001	-0,0004	0,009	0,019	0,0024	0,0035
Point K	172,989	232,986	0,0039	0,0154	0,06	0,041	0,0131	0,0093
coté 11		232,986		0,0240	0,019		0,0043	
coté 9	172,994			0,0078	0,019			
dist ED	74,5171			0,0050	0,023			
dist DF	147,104			-0,0077	0,026			
dist FE	165,063		Ecarts / angles	-0,0159	0,02		0,0036	
angle 10/11	128°43'59"		4"		30"			
angle 10/5	38°44'18"		24"	0,0002667	7"			
angle 29/30	63°01'30"		6"		10"			
angle 31/30	26°50'09"		19"		6'			
angle 29/31	90°04'30"		3'18"		7'			
circ dia 54	0,003				0,011		0,003	
plan 4	0,0043		0,0002667		0,007		0,0016	

Que peut-on dire de la machine utilisée ?
Elle se situe pour la plupart des mesures dans des écarts proches d'un écart type

Je note tout de même deux valeurs supérieures aux étendues de l'ensemble des résultats donnés dans les colonnes étendues (x et y).

L'angle de 38 °44'18" dont l'étendue sur les résultats est de 7" alors que sur notre machine la valeur moyenne de 38°44'42" est supérieure de 24" avec une étendue propre à notre machine de 6".
Un autre point supérieur aux valeurs enregistrées par l'ensemble des opérateurs est la distance entre le plan C et la droite OP (valeur "théorique" 232.986). :
Maxi des étendues à 0.019 alors que notre machine a un écart de 0.024 mm (233.009 mm) et une étendue de 0.051 ce qui est trop important par rapport au reste des autres mesures.
Sans doute un mauvais bridage!.
Ce point devra être vérifié par d'autres mesures.
Pour les autres valeurs mesurées, les valeurs obtenues sont conformes aux résultats globaux pour ce type de machine.

En conclusion, notre machine peut être utilisée comme machine représentative pour l'ensemble des incertitudes estimées.

CHAPITRE V

5-1- PROPOSITION D'UN MODELE DE CALCUL DES INCERTITUDES ET DES CAPABILITES SUR MMT

5-1-1-Méthodologie du calcul d'incertitude globale et du calcul de capabilité :

5-1-1-1- Rappels sur la relation entre l'incertitude globale et la capabilité :

Dans les différents chapitres traités, l'incertitude est donnée globalement sous la forme ± Ig ou Ig est calculée avec un seuil de confiance estimé à 0.95, c'est à dire avec k =2.
La norme NFE 02-204 (annexe B) préconise dans un premier temps de déterminer avec un maximum de rigueur l'incertitude de mesure en fonction des moyens de mesure utilisés, et de comparer ces incertitudes à l'intervalle de tolérance vérifié.

L'intervalle de tolérance peut être exprimé sous la forme ± IT/2 ou sous la forme H7 ou p8 etc. (système international d'ajustements).

La capabilité des moyens de mesure est le rapport entre de l'intervalle de tolérance à mesurer et l'incertitude globale estimée avec un risque de 5 % ou de 0.27 % suivant que l'on définit cette incertitude avec ± 3 Is ou ± 2 Is.
La règle ancienne du dixième, c'est à dire le rapport de 10 entre l'intervalle de tolérance mesuré et la résolution de l'appareil de mesure et a été modifiée au profit de la norme NFE 02-204 (annexe D).
Bien que cela ne soit pas véritablement une norme, la plupart des donneurs d'ordre préconisent un rapport minimum de 4 soit :

$$CMM = \frac{t}{\Delta\mu} = 4$$

Si nous appliquons la norme NFE 02-204 nous pouvons garantir la validité des éléments contrôlés en diminuant les limites de tolérances d'une valeur de k Is comme l'indique le graphique ci dessous :

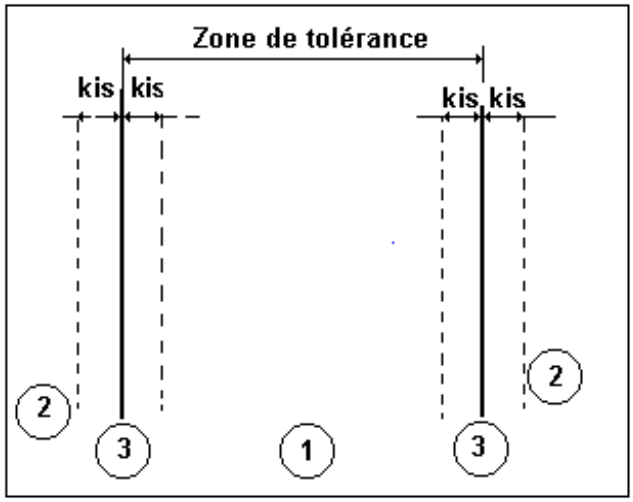


fig n°5 1 Zone d'acceptation et de refus

Prenons un exemple :
L'intervalle de tolérance est fixé à 40 H7 soit une valeur maximum de 40,025 mm et un minimum de 40,000 mm. (t=0.0025)
Si nous appliquons une CMM de 4, l'incertitude globale à $\Delta\mu$ = 6 Is ne doit pas dépasser :

$$CMM = \frac{t}{\Delta\mu} = 4$$

Soit $\Delta\mu$= 0.025 mm / 4 = 0.00625 mm et Is ne devra pas être supérieur à 0.00104 mm avec un seuil de confiance à 99.73 %.

En réduisant les tolérances avec un risque à 5 %, (soit 2 Is), les tolérances des limites d'acceptation de l'élément mesuré deviennent :

Minimum = 40.000 + (2* 0.00104) soit 40.00208 mm
Maximum = 40.025 - (2 * 0.00104) soit 40.02292 mm.

Les graphiques n°5-2 et 5-3 montrent les réductions de tolérance avec un risque à 5% ou à 0.27 %.

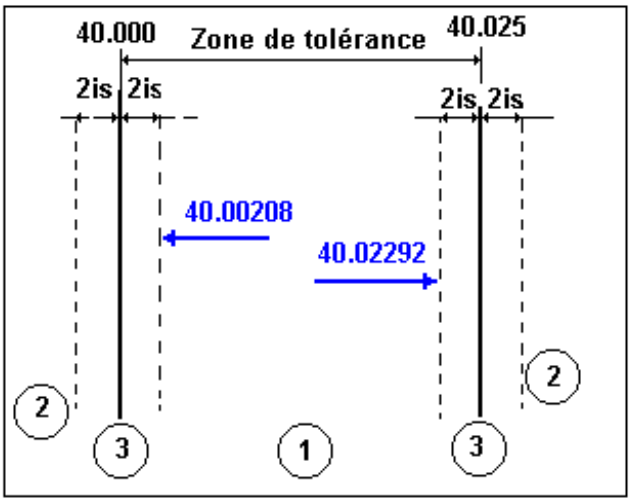


fig n°5 2 Tolérances modifiées

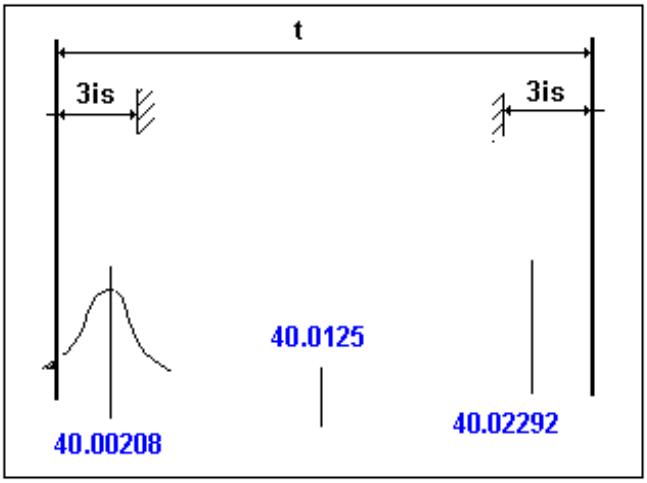


fig n°5 3 Application

5-1-2- Utilisation des résultats des chapitres 3 et 4

Dans le chapitre 3, nous avons tout d'abord quantifié les incertitudes de mesure dans l'opération de qualification du palpeur suivant les différents paramètres, que nous assimilerons principalement à des incertitudes de type A (voir annexe B), puis nous avons chiffré dans le chapitre 4 les incertitudes de type B pour les paramètres de base : point, droite, plan, cercle, sphère qui comportent des incertitudes de type B (donc exprimées globalement) et des incertitudes de type A qui donnent des erreurs de fidélité.

L'objectif du tableau n°5-1 qui va suivre et de calculer instantanément l'incertitude globale de la mesure en validant les paramètres choisis, de calculer la capabilité et de donner les réductions de l'intervalle de tolérance pour garantir la validité d'un produit.
Il sera même possible, en fonction du diagnostic de la capabilité, de conseiller d'autres conditions de mesure pour améliorer cet indice de capabilité.

Ce tableau sera en trois parties :
La partie qualification pour le n°5-1 avec le choix des paramètres.
La partie mesure d'éléments pour le n°5-2 avec le choix des paramètres.
La partie résultats pour le tableau n°5-3
Les incertitudes de type A seront déduites du n°5-1 et les incertitudes de type B le seront du n°5-2 avec dans certains cas des incertitudes de type A.

Prenons un exemple :
On décide de mesurer un diamètre 50 H8 en 40 points à la vitesse de 3.2 m /mn.
La qualification du palpeur utilisé (longueur de 30mm avec une bille de 3 mm de diamètre) est réalisée à la même vitesse de 3.2 m /mn.
Cette qualification sera faite en automatique en 5 points avec accostage suivant la normale.
Les deux tableaux n°5-1 et 5-1 reprennent ces valeurs.
Les mesures seront faites dans les conditions de qualification ;

tableau n°5 1

Qualification palpeur :

Longueur palpeur	10	20	**30**	40	50								
ϕ bille(mm)	1	1.5	2	**3**	4								
Vitesse m/mn	0.8	1.6	2.4	**3.2**	4	4.8	5.6	6	6.8	7.2	8		
Nombre de points	**5**	9	19										
Accostage normal	**N**												
Accostage quelconque	Q												
Angle α(°)	0	7.5	15	22.5	**30**	37.5	45	52.5	60	67.5	75	82.5	90
Angle β(°)	0-30	30-60	60-90	**90-120**	120-150	150-180	180-210	210-240	240-270	270-300	300-330	330-360	

tableau n°5 2

Mesure d'éléments :

Point	**vitesse**	0.8	1.6	2.4	3.2	4	4.8	5.6	6.4	7.2	8
Droite	**vitesse**	0.8	1.6	2.4	3.2	4	4.8	5.6	6.4	7.2	8
	nbre de points	3-5	5-10	10-15	15-20	20-40	40-60	60-80	80-100		
Plan	**vitesse**	0.8	1.6	2.4	3.2	4	4.8	5.6	6.4	7.2	8
	nbre de	3-5	5-10	10-15	15-20	20-40	40-60	60-80	80-100		

	points										
Cercle	**vitesse**	0.8	1.6	2.4	**3.2**	4	4.8	5.6	6.4	7.2	8
	nbre de points	3-5	5-10	10-15	15-20	**20-40**	40-60	60-80	80-100		
	ϕ	10-20	20-40	**40-60**	60-80	80-100					
Sphère	**vitesse**	0.8	1.6	2.4	3.2	4	4.8	5.6	6.4	7.2	8
	nbre de points	3-5	5-10	10-15	15-20	20-40	40-60	60-80	80-100		

5-1-3- Calculs *:*

Le tableau n°5-1 permet de calculer les incertitudes de type A et le tableau n°5-2 donnera les incertitudes de type B avec des incertitudes de type A
Dans tous les calculs qui suivent, les compositions quadratiques des écarts type sous-entendent que ces éléments sont indépendants.
Les paramètres choisis dans l'exemple sont :

a) Qualification palpeur :
Incertitude de type A :
Longueur 30 mm et vitesse du palpeur 3.2 m /mn (40 %)
Diamètre de la bille de palpage 3 mm.
Accostage normal en 5 points
Position de la tête α **= 37.5°**
β = **130 °**

b) Elément mesuré :

Qualification palpeur :
Cercle diamètre 50 H8 en 40 points à 3.2 m /mn (40 %).
Les conditions de mesure sont celle de la qualification palpeur.

Longueur et vitesse :
Le tableau n°3-25 page 126 et le graphique n°3-27 page 130 permettent de calculer l'incertitude sur le diamètre du palpeur en fonction des vitesses et de la longueur du palpeur.
Equation:

Is = 0.0009x + 0.7241 pour une longueur de 30mm

Soit Is= (0.0009*40) +0.7241 = 0.7601 (1)

Diamètre de la bille :
Les incertitudes sont les mêmes que pour une bille de 4 mm.

Angle α **= 37.5°**
Le tableau n°3-10 page 100 donne 0.00027 mm pour l'écart type du rayon (2)

Angle β = **130 °**

Le tableau n°4-13 page 108 donne entre 0.000136 mm pour l'écart type du rayon à 120° et .00021 pour 150°. On prendra une moyenne de 0.00017 mm. (3)

En composant quadratiquement les incertitudes (2) et (3) on obtient :

$$Is(tête) = \sqrt{(0.00027)^2 + (0.00017)^2} = 0.000342$$

Les valeurs équivalentes pour $\alpha = 0°$ et $\beta = 0°$ données par les mêmes tableaux sont :

Angle $\alpha = 0°$,

Le tableau n°4-10 page 100 donne 0.000168 pour 0°. (4)

Angle $\beta = 0°$

Le tableau n°4-13 page 108 donne 0.00014 pour 0°. (5)

En composant quadratiquement les incertitudes on obtient (6)

$$Is = \sqrt{(0.000168)^2 + (0.00014)^2} = 0.000219$$

Le rapport entre les deux positions de la tête de mesure permet d'affecter un coefficient à l'équation (1) par rapport à (6)

$$coeff = \frac{0.000342}{0.00022} = 1.57$$

L'équation finale (1) devient avec k=3 :

Is= ((0.0009*30) +0.7241)*coeff = 1.089 (7)

Et ±3 Is = ± 3.57 µm	**(valeur de A)**
Et ±2 Is = ± 2.38µm	**(valeur de A)**

Sur la qualification.

Elément mesuré :
Incertitude de type B :

Vitesse : 40% Nombre de points mesurés : 40 Longueur du palpeur : 40mm
Le tableau n°3-40 page 129 et les graphiques n°4-13 page 164 et n°4-14 page 164 permettent de calculer les paramètres incertitude type sur le diamètre et l'évolution d'un diamètre de 90 mm en fonction de la vitesse et du nombre de points mesurés.

Incertitude type : on prend la moyenne de 0.000273 (tableau n°4-15 page 165)

Variation du diamètre en fonction de la vitesse :

Le graphique n°4-13 donne 2 pentes :

y=-0.000027x + 90.0011 et y=-0.000020x + 90.0014 en tenant compte de l'erreur de reversibilité.
On travaillera avec l'équation moyenne de **y= -0.0000235 x + 90.00125**. (8)
Ce qui donne un diamètre à une vitesse de 40 % en fonction de (8)
Diamètre = 90.00031 mm et une constante d'erreur par rapport au diamètre théorique de la bague de 90.0034 mm de :
$\Delta\phi$= -0.00309 mm. **(9)**

En tenant compte du tableau n°4-13 page 162 et du graphique n°4-12 page 162, la constante d'erreur sur un diamètre de 90 mm était à la vitesse de 20 % :
y= -1^{E}-06 x^2 + 0.000143 x - 0.0044 = 0.0035 (valeur calculée) **(10)**

$$coeff = \frac{0.00309}{0.0035} = 0.88$$

Le coefficient coeff permet de calculer la constante d'erreur aux vitesses concernées.

Ce qui donne une constante d'erreur sur un diamètre en fonction du diamètre du cercle et de la vitesse (3.2 m /mn) de :
(9) * coeff = 0.00309*0.88= 2.72 µm

$\Delta\phi$= 0.00272 mm

Cette valeur est donnée avec un palpeur de 10 mm de longueur.
La constante palpeur donnée par le tableau n° 3-25 page 126 et l'équation (7) montre une évolution du rayon dynamique en fonction de la longueur.
La qualification ayant été faite avec le palpeur de longueur 30 mm cette constante palpeur sera connue.
Par contre, l'incertitude sur le rayon dynamique va être un paramètre complémentaire à la valeur affichée pour le cercle.
Cette incertitude sur le rayon donnée par le tableau n°4-1-53 page 103 ou équation (7) page 165 donne pour une vitesse de 3.2 m / mn avec un palpeur de 30 mm de longueur :

Is = ((0.0009*30) +0.7241)*coeff = 1.19µm **(7)**

Coeff=1.57

Cette incertitude sur le rayon dynamique est en prendre en compte deux fois car l'opération de mesure réalisée est la mesure d'un cercle et la valeur donnée est le cercle des moindres carrés passant par les centres des billes corrigées de 2 rayons dynamiques.
Soit Is (ϕ) = 0.00238 mm .

L'incertitude globale sur la mesure d'un alésage (assimilé à un cercle) de diamètre 50 H7 avec un palpeur de 30 mm en 40 points une vitesse de 3.2 m /mn après une qualification en 5 points avec accostage normal à cette même vitesse de 3.2 m /mn est de :

Incertitudes de type A :

- **Incertitude sur le rayon dynamique en qualification**
- **Incertitude sur le diamètre dynamique (fidélité) en mesure du cercle.**

Incertitude globale de type B

- **Constante d'erreur sur le diamètre (assimilé à un cercle)**

Soit

$$Is = \sqrt{(0.0019)^2 + (0.00238)^2 + (0.00272/3)^2} = 2.62\mu m$$

Avec k =3 l'incertitude globale est ± 7.86 µm

Avec k =2 l'incertitude globale est ± 5.24 µm

5-1-4-Conclusions :

Si on compare avec l'incertitude donnée par le constructeur pour cette machine qui est de :
± 3 µm + 4L /1000
Soit pour un diamètre de 50 mm une incertitude de ± 5.2 µm (pour U95 soit k=2) on constate que la valeur de l'incertitude est celle annoncée globalement.

Mais si l'on modifie seulement un des paramètres , vitesse ou longueur du palpeur, ces incertitudes estimées globalement ne correspondent plus aux valeurs données par le constructeur.
En annexe H, les valeurs données par le logiciel seront obtenues instantanément par simple affichage des paramètres utilisés.

5-1-5-Calcul du CMM :

$$CMM = \frac{t}{\Delta\mu} = 4$$

Soit pour 50 H8 l'intervalle de tolérance est de : 0.0039 µm (NFE 04 -120)
Donc t= 0.039 mm et Δµ= 0.01558 mm. (u 99.73)

$$CMM = \frac{0.039}{0.0156} = 2.50$$

On constate que la valeur du CMM = 4 est difficile à obtenir dans ce cas sauf modification de la procédure de qualification n°4-4-4-6 page 144.
En appliquant la norme 02-204 (annexe F) et le guide ISO TAG 4 :

La modification des tolérances devient :

Avec un risque à 5 % les tolérances passent à 50.0195 ± 0.0143 (arrondis)

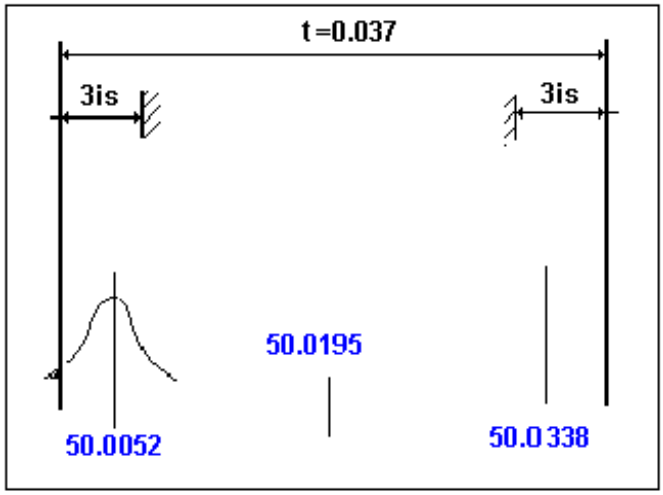


fig n°5 4 Application

Avec un risque à 0.27% les tolérances passent à 50.0195 ± 0.017 (arrondis)
Autres incertitudes permettant de compléter les résultats :

Incertitude sur les coordonnées du centre :
Ig (coord)= ± 0.0046 mm (k=2)

Incertitudes sur le défaut de circularité :
Ig (□c)= 0.010± 0.0018 mm (k=2)

5-1-6-Exemple de tableau complet :

tableau n°5 3 Qualification palpeur :

Longueur palpeur	10	20	**30**	40	50								
ϕ bille(mm)	1	1.5	2	**3**	4								
Vitesse m/mn	0.8	1.6	2.4	**3.2**	4	4.8	5.6	6	6.8	7.2	8		
Nombre de points	**5**	9	19										
Accostage normal	**N**												
Accostage quelconque	Q												
Angle α(°)	0	7.5	15	22.5	**30**	37.5	45	52.5	60	67.5	75	82.5	90
Angle β(°)	0-30	30-60	60-90	**90-120**	120-150	150-180	180-210	210-240	240-270	270-300	300-330	330-360	

tableau n°5 4 mesure d'éléments

Mesure d'éléments :

Point	**vitesse**	0.8	1.6	2.4	3.2	4	4.8	5.6	6.4	7.2	8
Droite	**vitesse**	0.8	1.6	2.4	3.2	4	4.8	5.6	6.4	7.2	8
	nbre de points	3-5	5-10	10-15	15-20	20-40	40-60	60-80	80-100		
Plan	**vitesse**	0.8	1.6	2.4	3.2	4	4.8	5.6	6.4	7.2	8
	nbre de points	3-5	5-10	10-15	15-20	20-40	40-60	60-80	80-100		
Cercle	**vitesse**	0.8	1.6	2.4	**3.2**	4	4.8	5.6	6.4	7.2	8
	nbre de points	3-5	5-10	10-15	15-20	**20-40**	40-60	60-80	80-100		
	ϕ	10-20	20-40	**40-60**	60-80	80-100					
Sphère	**vitesse**	0.8	1.6	2.4	3.2	4	4.8	5.6	6.4	7.2	8
	nbre de points	3-5	5-10	10-15	15-20	20-40	40-60	60-80	80-100		

tableau n°5 5 Tableau des résultats

Diamètre	**Tolérance**	**Is (mm)**	**± 2Is U 95**	**± 3Is U 99.73**	**CM M**	**Tolérances modifiées** ± 2Is (mm)	**Tolérances modifiées** ± 3Is (mm)
50 H7	0.039 mm	0.0025mm	0.0050mm	0.0074mm	2.62	50.0195 ± 0.010	50.0195 ± 0.015

Incertitudes sur les coordonnées du centre(mm)	**Incertitudes sur la circularité (mm)**
± 0.0028	0.010± 0.0019

5-2-MODELISATION PAR LOGICIEL PERMETTANT DE GLOBALISER TOUS CES CALCULS .

Voici un début de logiciel permettant d'obtenir les différentes incertitudes de mesure suivant les paramètres utilisés par l'opérateur.
Dans la première partie, on obtient l'incertitude de qualification en fonction de :

- Longueur du palpeur
- Diamètre de la bille de palpage
- Vitesse d'accostage
- Nombre de points sur la sphère de qualification
- Type d'accostage
- Position de la tête de mesure pour l'angle α
- Position de la tête de mesure pour l'angle β

Le résultat donné est l'incertitude type **Is** tenant compte de tous ces facteurs.
Dans la deuxième partie, on obtient les incertitudes de mesure associant les qualifications palpeurs et la mesure d'éléments.
On retrouve :

- La mesure d'un point
- La mesure d'une droite
- La mesure d'un plan
- La mesure d'un cercle
- La mesure d'un cercle
- La mesure d'une sphère

Une troisième partie est une ébauche de l'utilisation des résultats précédents pour le calcul des distances :

- Entre points, entre point /droite, entre droites, entre cercles, entre sphères .

Il sera possible d'utiliser ces calculs pour les relations, les symétries etc...

QUALIFICATION

Longueur du Palpeur =	30
Diamètre de la Bille =	4
Vitesse =	40
Nombre de pts qualif =	5
Accostage =	N
Angle A =	37,5
Angle B =	120
Incertitude A (µm)	1,190

MESURE D'ELEMENTS

Mesure d'un point

INCERTITUDE 2 Is 2,427

Mesure d'une droite

Nombre de points 20

INCERTITUDE 2 Is 2,537

Mesure d'un plan

Nombre de points 25

INCERTITUDE 2 Is 1,688

Mesure d'un cercle

diamètre 20

Nombre de points 20

INCERTITUDE 2 Is 2,477

Mesure d'une sphère

diamètre	20
Nombre de points	61
INCERTITUDE 2 ls	2,488

Tolérances en mm

50,039	ls=	0,0025	CMM=	2,624
50	2 ls=	0,0050	Tolérances modifiées	
	3 ls=	0,0074	Max=	50,039
			min=	50,000
	coordonnées du centre		circularité	
	0,00228		0,00299	

point	2ls=
	0,0016

droite	2ls=
Max=	0,00169
Min	0,00279

Plan	2ls=
Max=	0,00220
Min=	0,00262

sphère	2ls
diamètre	0,00249
coordonnées	0,00228

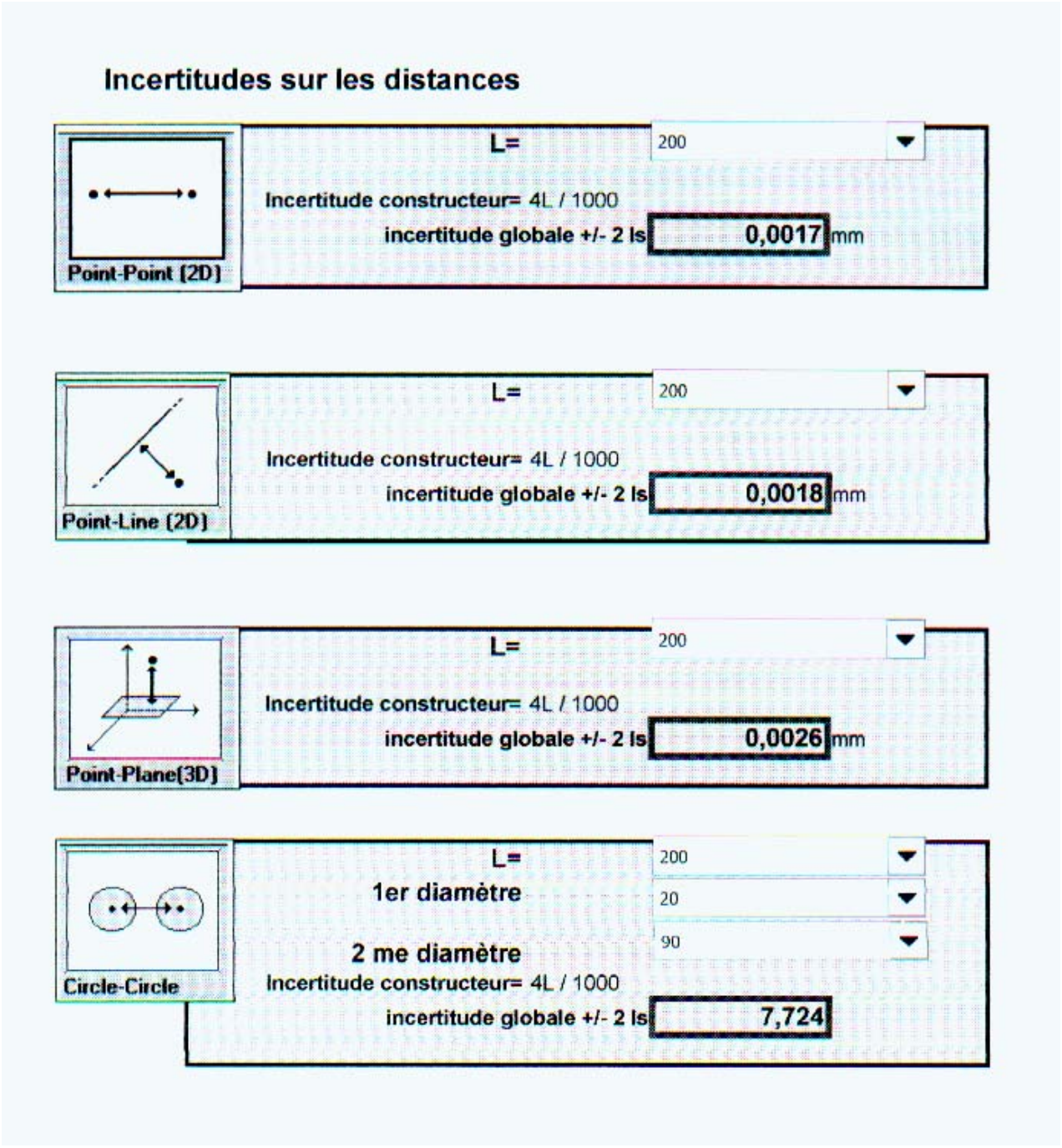


tableau n°5 7 troisième page de résultats

5-3-VALIDATION

Les résultats de l'intercomparaison du BNM apparaissent dans le tableau n°5-8 ci dessous

DESIGNATION DES CARACTERISTIQUES ***Valeurs mesurées sur la pièce test***	***REPERE***	***TOUTES MACHINES*** ***Incertitudes sur la pièce test***	***CALCULS palpeur 50mm et vitesse 1.6 m/mn*** ***Incertitudes minimum***
Coordonnées d'un point, Intersection d'un axe et d'un plan domaine 20-190 mm	*1-2-3-4-5-6*	***± 2.5 µm***	***± 1.90 µm***
Coordonnées d'un point intersection de deux droites hors matière	*7-8*	***± 28 µm***	*Calculs non effectués*
Distance point- point (intersection pour chacun d'une droite avec un plan)	*9-10-11-12-13*	***± 9.8 µm***	***± 1.33 µm***
Distance droite - plan	*14*	***± 12 µm***	*Calculs non effectués*
Entraxes (distance de deux points dans un plan)	*15-16-17*	***± 4.6 µm***	***± 6.0 µm***
Défauts de forme Planéité Rectitude Circularité	 *26* *25* *23*	 ***± 6 µm*** ***± 9 µm*** ***± 3.5 µm***	 ***± 2.477 µm*** ***± 2.537 µm*** ***± 3.17 µm***

tableau n°5 8 Bilan des intercomparaisons [7]

Ces incertitudes sont obtenues instantanément à l'aide des tableaux n°5-5 à 5-7 des pages 198-199 et 200

CONCLUSIONS GENERALES

6-1 CONCLUSIONS GENERALES

L'ensemble de cette étude montre que les incertitudes de mesure sur une machine à mesurer tridimensionnelle ne peuvent être obtenues par la simple utilisation de la formule classique donnée par l'ensemble des constructeurs et aussi, il faut bien le dire, par les normes actuelles de réception de ces machines.

Bien que cette étude ne soit pas complète, car il manque beaucoup de paramètres à prendre en compte comme notamment toute la partie étude des positions comme parallélisme, perpendicularité, symétrie, localisation etc., et les configurations particulières comme les rallonges de palpeurs ou les palpeurs de type étoile, elle montre que les constructeurs doivent donner plus d'informations sur les incertitudes véritables de leurs machines.

Il est possible maintenant d'effectuer un calcul de capabilité plus en rapport avec la réalité en prenant en compte les paramètres réels des conditions de mesures, tout au moins pour les paramètres utilisés le plus fréquemment.
Il est bien évident que les résultats obtenus ne sont qu'une indication sur les variations de la machine que nous avons utilisée.
Mais un programme de corrélation comprenant 30 qualifications d'un palpeur de diamètre 4 mm en 5 points avec accostage normal à une vitesse de 1.6 m /mn identique au programme du tableau n°2-1 page 35 et un autre identique au n°4-14 page 163 sur une bague de diamètre 90 mm à une vitesse de 1.6 m / mn en 100 points sur 30 mesures de diamètre avec la même vitesse d'accostage et un accostage normal permettrai de tirer des conclusions sur la machine testée et d'appliquer un coefficient éventuel de minimisation ou de dégradation suivant les résultats obtenus.

Par ailleurs les opérateurs doivent aussi être conscients qu'une machine tridimensionnelle, si elle demeure un outil fabuleux dans le contrôle moderne, doit être considérée comme un appareil de mesure plus rapide, plus convivial, en un mot plus universel que d'autres moyens plus classiques, mais qui ne peut donner que des résultats entachés d'incertitudes non négligeables et que ces incertitudes doivent être prises en compte dans un véritable calcul de capabilité.

La mesure étant une science imparfaite par définition, tout résultat doit être pris avec d'infinies précautions.

En résumé, je propose que chaque logiciel soit fourni en tenant compte de ces remarques.
L'ébauche du logiciel précédent pourra être une base de départ à ces recommandations (# 5-2).

PERSPECTIVES

6-2 PERSPECTIVES

Tous ces travaux pourraient être complétés dans deux directions :

Du point de vue industriel :
L'utilisation d'un logiciel de base comme Excel n'est pas suffisamment performant pour traiter complètement toutes les données d'une manière industrielle.
Il me paraît important qu'un constructeur ou une société informatique puisse reprendre ces travaux afin de développer un logiciel plus adapté.

Du point de vue recherche :
Tous les résultats obtenus regroupent un très grand nombre de mesures (environ 80 000) .
Toutes ces valeurs expérimentales ont fait l'objet d'une modélisation à l'aide d'outils mathématiques et informatiques et testés sur les formes de distribution grâce à des logiciels adaptés.
Les critères étudiés sont ceux que la plupart des métrologues connaissent comme ayant une influence sur l'incertitude mesure.
L'outil mathématique, du point de vue statistique a été vérifié et est utilisable.

Les modélisations existent et pourraient servir de base à une approche plus globale afin d'optimiser les résultats**.[61],[62],[38],[39]**

Les plans d'expériences (méthodes taghuchi, méthode de l'orthogonalité ou d'autres) seraient une manière de diminuer le nombre de mesures pour pouvoir explorer un plus grand nombre de paramètres.
Il s'agit dans le cas des MMT de résolution des incertitudes de chaînes complexes et les plans d'expériences doivent être d'un grand secours pour globaliser les résultats

Cette globalisation serait un complément aux travaux déjà réalisés dans les compensations géométriques et thermiques notamment.

Il reste aussi à travailler dans les incertitudes de position comme le parallélisme, la symétrie, la perpendicularité... et l'amélioration des têtes de mesures afin de donner une meilleure approche des défauts de forme qui, à mon sens, n'est pas du tout résolu sur ce type de machine

BIBLIOGRAPHIE

[1] Estimation des incertitudes sur MMT (application à la planéité) D .Duret- W Dauzou IUT Annecy. Contrôle industriel n°.201 nov 96.

[2] Contribution à la mesure tridimensionnelle. modèle d'identification géométrique des surfaces.Pierre Bourdet . Thése d'état Université de Nancy 1 . 1987

[3] Cotation tridimensionnelle des systèmes mécaniques. Théorie et pratique. A Clément- A Riviére- Temmernau . PYC édition 1994

[4] Métrologie fonctionnelle par calibre virtuel sur MMT .Définition nouveau tolérancement principal et méthodes de vérification sur MMT
E Pairel . Thése Doctorat Savoie Dec 1995. 7eme Congrés de Métrologie Nimes 95

[5] Contrôle par calibre sur MMT
D Duret Revue pratique Contrôle Industriel n°175 . juil 92.

[6] Dessin technique . cotation et tolérancement . NFE 04.554

[7] Intercomparaison sur MMT.
G Vailleau .Revue pratique contrôle industriel n° 183 nov 1993.

[8] Contrôle par calibre sur MMT
D Duret. S Tichadou. M Giordono . R Andrieux
Clearance Space in volumetric dimensionning Annals of the CRIP Volume 41 Aôut 1992.

[9] Prise en compte des éléments normatifs pour la mise en place d'une procédure de vérification périodique de MMT. J.P Sénelear . Revue pratique de contrôle industriel n° 175 Juin 1992.

[10] Métrologie dimensionnelle Normalisation.
D.Koplewicz UNM Revue pratique contrôle industriel N°174 Avril 92.

[11] MMT et incertitudes de mesure.
M.Priel Métrologie Grand sud .Séminaire 24 et 25 nov 1995.

[12] GUM93 . Guide to the expression of incertity in measument.
1ere Edition 1993. International organisation of standardization.

[13] La métrologie en PME-PMI. Pratique de la mesure dans l'industrie.
J.Vincent. AFNOR 1996.

[14] Vérification des tolérances des produits. Déclaration de conformité.
Norme NF E 02-204 déc 1993. Révision ISO 14253-1

[15] Système ISO de tolérances et d'ajustements.
Norme internationale ISO 286-1 1988.

[16] Système ISO de tolérances et d'ajustements.
Norme internationale ISO 286-2 1988.

[17] Système ISO de tolérances et d'ajustements.
Norme européenne et française EN 20286-1 et EN 20286-2 avril 1993.

[18] Métrologie par coordonnées. Partie 2 : Evaluation des performances des machines à mesurer tridimensionnelles . Norme européenne et française NF EN ISO 10360-2 oct 1995.

[19] Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de Métrologie.
Norme française NF X 07-001 décembre 1994.

[20] Métrologie dans l'entreprise "fonction métrologique": Norme française NF X 07-010
Constat de vérification: Norme française FD X 07-011.
Certificat d'étalonnage: Norme française FD X 07-012.
Raccordement aux étalons: Norme française FD X 07-015.
Procédures d'étalonnage et de vérification: Norme française FD X 07-016 .

[21] Contribution à la modélisation de la précision géométrique des machines à coordonnées P Chollet Thèse de Doctorat Ecole Centrale Paris. Sept 1991.

[22] Les formations aux métiers de la Métrologie Joel Lasnier, Gabriel Cloitre, Jean Yves Arriat Métrologie dans l'entreprise Afnor 1996

[23] L'assurance de la qualité en métrologie, les exigences des normes ISO 9000.
G Bavelard, M Vallès. La métrologie en PME,PMI.

[24] Les formations en métrologie dimensionnelle Educatec Paris novembre 1997.Gabriel Cloitre.

[25] Le contrôle tridimensionnel sur machine à mesurer et sur machine outil.
T Correvits et J F David.

[26] Guide répertoire de l'assurance qualité.
Provence cote d'azur - Languedoc Roussillon – Corse 1996.

[27] Métrologie dans le cadre de la certification ISO 9000.
C Colas , P Reposeur . Métrologie dans l'entreprise Outil de la Qualité.Afnor 1996

[28] Mesure et incertitudes.

M Priel . Métrologie dans l’entreprise Outil de la Qualité.Afnor 1996

[29] Norme européenne EN29000 Normes pour la gestion et l’assurance de la qualité.
Gérer et assurer la qualité Afnor 1989

[30] Historique de la Métrologie Jean Claude Hocquet
Presse Universitaire de France Collection "que sais-je"

[31] Système Qualité-Modèle pour l'assurance Qualité en production et installation
ISO 9002 part 4-10 et 4-11 -1987-

[32] Les incertitudes de mesures; Applications pratiques Bernard Allisy
Bulletin d'information du Bureau National de Métrologie n°53 et cours de métrologie du CNAM 1972

[33] Initiation pratique à la statistique A.Liorzou Eyrolles 1973

[34] Estimations et tests statistiques
Normes NFX 06-050 Recueil de Normes AFNOR Tome 2 -1996

[35] Le système métrique d'hier et d'aujourd'hui à tous les temps, à tous les peuples.
A Le Bouch, L Marquet, Y Roussel, P Giacomo Edition A.D.C.S 1997

[36] Les traitements des données expérimentales.
Cours de métrologie du Conservatoire National des Arts et métiers
A Allisy 1972

[37] Vérification des tolérances des pièces libres
Normes NFE02-202 déc 1994
Spécification géométrique des produits GPS Tome 1- 9^{e} édition AFNOR-UNM 1996

[38] Etasami F,Qiao H, Analysis of Two-dimensional Measurement Data for Automated Inspection, "J of Manufacturing Systems, Vol 9, N°1,1990

[39] Hopp T, Reeve C P, "an algoritm for Computing the minimum Covering Sphere in Any dimension", submitted to SIAM J , of computing

[40] Traband M T, Joshi S, Wiysk R A, Cvalier T M, "Evaluation of straigmess and Flatness Tolérances using minimum Zone "manufacturing Reviev, Vol n°2, N°3,ASME, New York, Sept 1989, 189-195.

[41] L'impact économique de la spécification géométrique des produits sur l'entreprise mécanicienne. SOUQUET P, CETIM Senlis .
Contrôle Industriel novembre 1998

[42] Processus Elémentaire de mesure tridimensionnelle, J M LINARES, J M SPRAUEL,
Contrôle Industriel juin 1998

[43] AJ de VICENTE, " A generalization of the law of propagation of incertainty, an example of determining screww thread uncertainty "
Laboratorio de metrologia y metrotecnia Universitad Politecnica de Madrid

[44] Farmer L.E, Gladman C.A "Tolerance Technology- Computer Based Analysis"
Annals of the CIRP, Vol 35, Part 1, 1986, April 1989

[45] C. PERRUCHET, M. PRIEL, "Convergence entre la norme ISO 5725: exactitude des résultats et méthodes de mesure" , et le guide pour l'expression de l'incertitude de mesure.
Congres international de Métrologie 1997

[46] BALSAMO.A, FRANKE M,TRAPET E, WALDELE F, DE JONGE L, VANHERCK P, "Results of the CIRP-Euromet Intercomparaison of Ball plate-Based Techniques for detrmining CMM Paramatrics errors

[47] NORME NFE 11-150 Norme de vérification des MMT

[48] NORME NFX 06-046 Application de la statistique - traitement des résultats de mesure. Propagation des erreurs AFNOR Tome 5

[49] NORME NFX 06-072 Estimations et tests statistiques
Méthodes statistiques AFNOR Tome 2

[50]] NORME NFX 06-065 Estimations des tests Statistiques Introduction à l'utilisation des test statistiques Comparaison de deux échantillons
Méthodes statistiques AFNOR Tome 2

[51] Annick RAZET, "Cercle des moindres carrés: Résolution analytique et applications"
Congres international de Métrologie 1997

[52] A. HUET, " la machine à mesurer devient progressivement un acteur indispensable du processus de fabrication en atelier"
Congres international de Métrologie 1997

[53] L. LEGENDRE " Contribution des plans d'expériences à la réduction des incertitudes de mesures "
Congres international de Métrologie 1997

[54] D.FEAUTRIER " La calibration des machines à mesurer tridimensionnelles : Utilisation de pièces tests munies munies de sphères LURPA/ENS Cachan Sept 1995

[55] DOIRON T.D, STOUP J.R, Uncertainty and dimensional Calibrations, J Res NIST 102:647;1997

[56] ESTLER W.T, PHILIPS S.D; BORCHARDT B.R, HOPP T, LEVENSON M, EBERHARDT K, McCLAIN M, "Pratical aspect of touch trigger Probe error, Proc ASPE 1995

[57] ZHANG.G " A displacement method for machine geometry calibration Article Annals of CIRP Vol 37/1/88

(58] B SCHATZ "Etude d'un étalon 3D pour la vérification des machines à mesurer tridimensionnelles "
revue pratique du contrôle industriel

[59] HANSEN H.N, DE CHIFFRE L , Nordic audit of Coordinate Measuring machines
-Final Report Euromet Project N°330- 1996

[60] KUNZMANN H, TRAPET E, WALDELE F, "A uniform concept for the trceability of measurements with Coordinate Measuring Machines , Proc 7th IPES, Kobe , 41-52- 1990

[61] SARTORI S, ZHANG G.X, "Geometric error measurement and compensation of machines, annals of the CIRP, 44/2:599-609 -1995

[62] SCHULTHICK R, "The component of volumetric accuracy, annals of the CIRP , 26/1:223-522.- 1977

[63] BALSAMO A, "effects of arbitrry Coeffeicients of errors maps on prbe qualification, Annals of the CIRP 44/1:475/478- 1995

[64] BOURDET P, CLEMENT A, WEILL ,"Methodology and comparative study of optimal identification processes for géométrically defined surfaces International symposium on Métrology fo-1984

[65] CASTELJAU P, "le lissage ", livre, Hermes

[66] FALL M et CLEMENT A ," Software certifier " Doctorat

[67] CLEMENT A et FALL M , "Sftware control relying on inverse problem theory SCRIPT
Conférence Autriche

[68] MATHIEU A, LARTIGUE C, BOURDET P, "Contrôle des spécifications par zone de tolérance (ISO 1101): Solutions proposées par les logiciels de MMT sources de non-qualité .
Congrès international métrologie 1995

[69] DAVID J.M, COOREVITS T, "Les limites de la correction par logiciel des erreurs des MMT: Architecture d'une nouvelle machine
Congrès international métrologie 1995

[70] SARTORI S, CRESPO P.C, DI CIOMMO, KANCHEVA "Une meilleure approche de la précision des machines à mesurer"
Annals CIRP

[71] PRIEL M "Réflexion sur l'estimation des incertitudes des mesures de longueur à l'aide d'une MMT
Bulletin du BNM n°92 Avril 1993

[72] MATHIEU L, CASTANG A, "Contrôle des spécifications par zones de tolérances (ISO1101):Quantifications des erreurs causées par les méthodes de traitement des points mesurés.
Congrès international de métrologie 1995

[73] BOURDET P, CLEMENT A, "Controlly a complex Surface with a 3 measuring machine, 1976 Annals of CIRP, Vol.25, pages 354-361

Contribution a la connaissance et à la modélisation des paramètres influant sur la capabilité des procédés de mesure tridimensionnelles.

L'utilisation de machines à mesure tridimensionnelle s'est généralisée dans les grosses entreprises et chez les sous traitants. La mise en place des normes ISO 9000 et les calculs de capabilité qui en découlent impliquent une connaissance approfondie des incertitudes de mesures. Dans les machines à mesurer, l'incertitude globale et les normes utilisées sont généralement indiquées. Les incertitudes de mesure de ces différentes machines sont exprimées sous la forme : ± **A+ bL ou A** est une incertitude représentative de la fidélité et **bL** est une incertitude de position en fonction de la longueur. La géométrie et l'environnement de ces machines étant actuellement pris en compte par les logiciels, il reste l'influence méconnue d'un grand nombre de paramètres (relatif au capteur) : longueur, diamètre, vitesse ainsi que le type et nombre de points de l'élément mesuré. Nous proposons de donner une méthode d'obtention rapide, suivant les critères choisis par l'opérateur, de l'incertitude de mesure et de l'indice de capabilité plus proche de la réalité.Le premier chapitre présente la situation actuelle des machines à mesurer vis à vis des ISO 9000 et l'état de l'art dans ce type de matériel. Dans le chapitre deux, une étude expérimentale a été réalisée pour déterminer la taille des échantillons utilisés pour notre étude. Dans le chapitre trois, nous proposons nous trouverons l'étude expérimentale et la modélisation sur la qualification du capteur. Le chapitre quatre est une étude expérimentale et la modélisation des éléments de base et les résultats de la pièce test. Le chapitre cinq est la proposition d'un modèle général de calcul des incertitudes et des capabilités. Le chapitre 6, les conclusions et les perspectives. Les annexes comprennent la MMT utilisée et son logiciel, les normes, certificats d'étalonnage, les programmes développés.

A contribution to the knowledge and modelisation of the influence of parameters for the capability of three-dimensional machines

Abstract: Three-dimensional measuring machines have come into general use in big firms and among subcontractors. The enforcement of ISO 9000 standards and the ensuing capability calculations require a thorough knowledge of measurement uncertainty.

In measuring machines, global uncertainty and the standards used are generally indicated.

The measurement uncertainty of these different machines is given in the following form :± A+bL:.A representing an accuracy uncertainty and bL a position uncertainty related to the length. The geometry and environment of these machines being currently taken into account by application programs, there remains many unknown parameters connected to the sensor :its length, diameter, speed, type and the number of points of the measured element.We aim at presenting a method permitting to quickly obtain the measurement uncertainty and the index of capability according to the operator's selected criteria; and rapidly get an index of capability closer to reality.

Chapter 1 examines the history of measurement and the importance of the enforcement of ISO 9000 standards and research bibliography .

Chapter 2, presents the statistical methods used and the analysis of the various parameters studied. These are validated through a systematic analysis of the results.

Chapter 3 present influence parameters for the probe calibration .

Chapter 4 present influence parameters for measument of point, righteous, plane, circle, sphere, and values of the test piece,.

Chapter 5 presents the summary table enabling us to obtain the index of capability immediately and an example leading to a modification of the current programs which permit to take these capability calculations into account.

Chapter 6 comprises our conclusions and chapter 7 the various standards, calibration certificates, and specifically developed application programs.

Contribution à la connaissance et à la modélisation des paramètres influant sur la capabilité des procédés de mesure tridimensionnels

Annexes

Gabriel CLOITRE

ANNEXE A:

1-1 LA MESURE A L'AIDE DES MACHINES A MESURER

1-1-1 Les machines à mesurer

Dans le domaine des machines à mesurer, le choix est extrêmement difficile car actuellement les propositions des différents constructeurs ne permettent pas de se faire une idée réelle des performances des machines proposées.
En effet rien ne ressemble plus à une machine à mesurer qu'une autre machine à mesurer.
Pour un décideur, c'est souvent le prix de la machine qui va l'emporter sur la technologie et les performances.
Nous classerons ces machines en trois catégories :

1) **Les machines manuelles** de faibles capacités équipées de têtes dynamiques à déclenchement et à déplacement manuel.

Ce type de machine, comparable à des machines d'atelier, permet de simplifier le contrôle par rapport au contrôle classique sur marbre, mais ne permet pas complètement de garantir que le produit est conforme.
Les résultats de mesure sont trop dépendants de l'opérateur et de ses choix technologiques.
L'influence de la vitesse et aussi l'angle approximatif d'accostage choisi par l'opérateur influent beaucoup sur le résultat final et bien d'autres paramètres ne sont pas pris en compte.
Il en résulte que l'incertitude globale de ces machines est bien souvent supérieure à l'intervalle de tolérance contrôlé.
Leur seul avantage réside dans un coût d'investissement relativement bas et un gain de temps appréciable par rapport au contrôle sur marbre.

2) Les machines de plus grande capacité à commande numérique et à tête dynamique orientable à déclenchement.
Sur ce genre de machine, quel que soit son type (portique (figure n°A1), col de cygne ou à structure à potence), la vitesse et l'angle d'accostage peuvent être maîtrisés.
De plus elles sont souvent équipées de têtes orientables motorisées, ce qui donne une certaine garantie de *répétabilité* ou de *reproductibilité* dans les mesures [voir annexe A].
Mais bien que ce type de machine soit très répandu, l'hétérogénéité des différents constituants (marbre, traverse, colonne) peut être un des facteurs non négligeables de l'incertitude globale de la machine. (influence des variations thermiques dans le local de mesure par exemple)
On constate aussi une marche en "crabe" liée à la partie motrice excentrée par rapport à l'axe principal (généralement l'axe X).

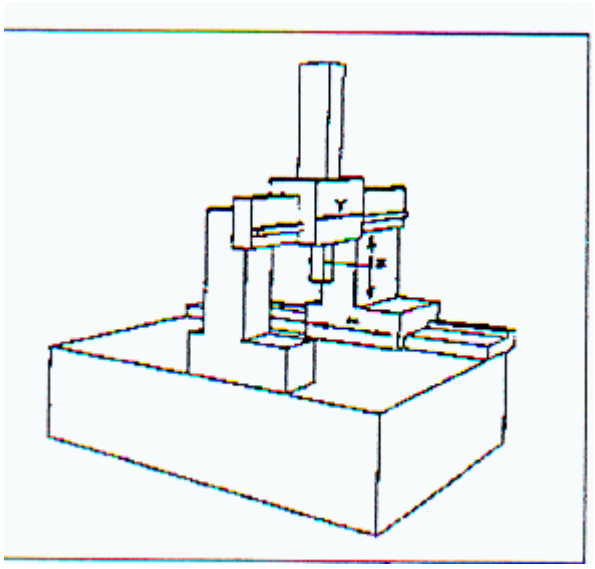


fig n°A 1 Machine à portique

Dans ce type de machine, les règles de lecture ne sont jamais situées dans l'axe réel de la mesure, et cela nuit effectivement à la qualité de la mesure.
On corrige en partie ce genre d'erreurs par un maillage par logiciel, mais le respect d'Abbe n'est qu'une partie des sources d'erreurs que l'on trouve dans ce type de machine.
Il reste les problèmes liés à la nature même de la tête de mesure et les erreurs de reproductibilité des déplacements.
La prise de points se faisant à la volée, les facteurs faisant varier la fidélité (annexe A) sont tributaires de beaucoup de paramètres que nous allons analyser par la suite.
Pour pouvoir analyser les erreurs possibles directement liées à la tête de mesure, il est important de connaître le principe de mesure des têtes dynamiques à déclenchement.

Principe de la tête dynamique à déclenchement (1970 David Mac Murtry) [25]
La tête de mesure (figure A2) est constituée d'un palpeur comportant trois galets maintenus en appui à l'aide d'un ressort sur un support fixe avec trois couples de billes solidaires du corps (liaison de Boys).
Le système est dit isostatique car les six degrés de liberté sont fixes (trois translations et trois rotations).
Au moment du contact bille pièce, les efforts sur les six points varient brusquement jusqu'au décollement d'un des appuis et la lecture, grâce au circuit électronique interne, peut se faire "instantanément" sur les règles de mesures.
Conclusion:
On voit bien, même avec une très grande précision des différents usinages, toutes les influences que peuvent subir les résultats de prises de points.
Par contre le quasi-monopole de Rénishaw a créé de fait une sorte de standardisation pour les machines du deuxième type.

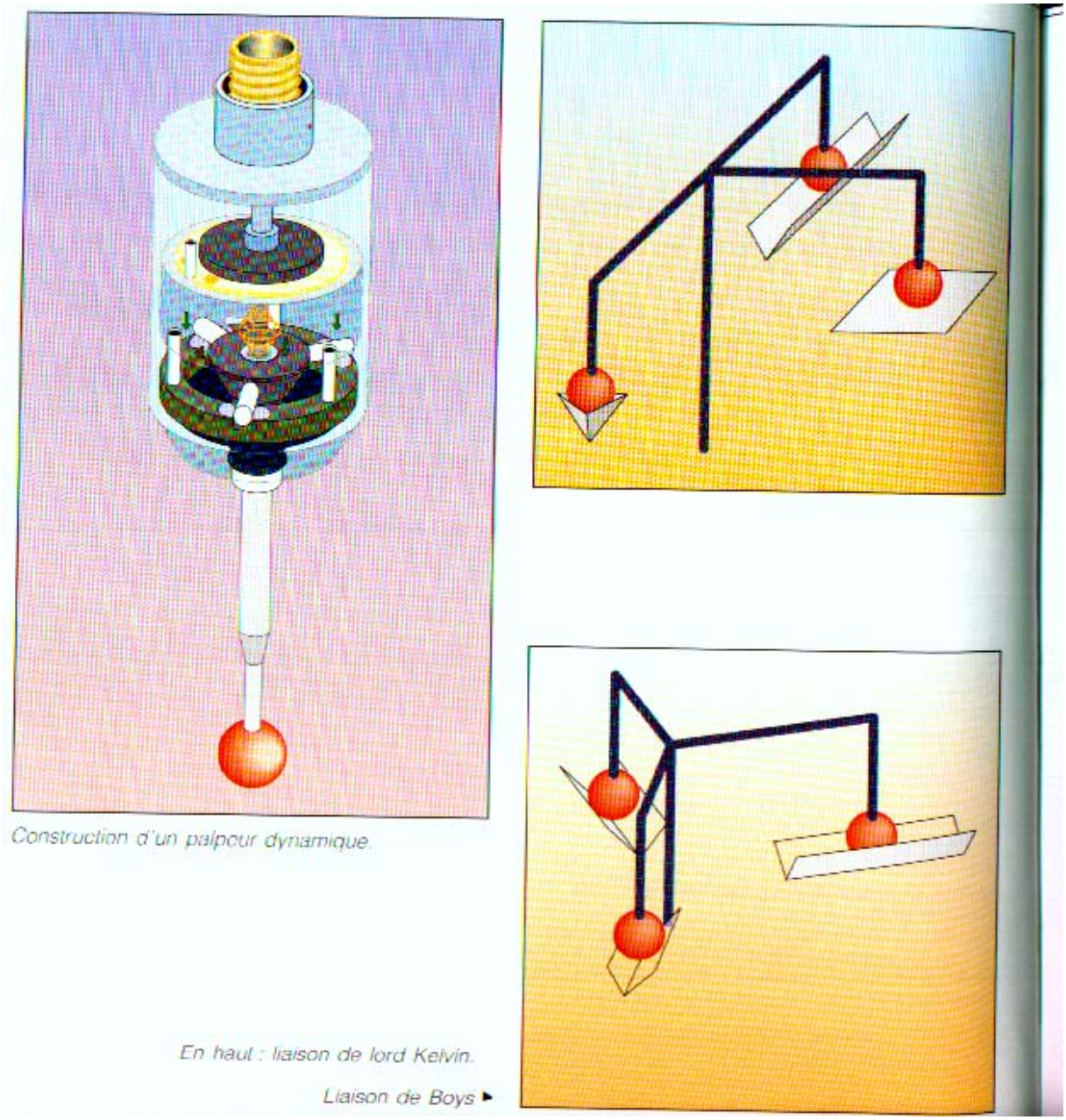


fig n°A 2 **Tête dynamique à déclenchement de Rénishaw**

Les machines du troisième type sont beaucoup plus performantes en termes de précision, mais beaucoup moins répandues car beaucoup plus chères (dans un rapport de 3 à 5 pour une même capacité).

3) Les machines de haute précision à tête statique mesurante.

Le principe de la tête mesurante (figure n°A3) est un ensemble de trois parallélogrammes déformants solidaires du corps du palpeur.

Au repos, les trois parallélogrammes reliés électriquement à un système de pont capacitif mettent celui ci à 0.

Au moment du contact, l'un au moins des parallélogrammes est déformé mettant le pont en déséquilibre.
La machine, par son asservissement interne, analyse le sens et la direction du retour à l'équilibre et ramène la machine à la position d'équilibre à 0 de la tête.
La prise de points se fera à cet instant seulement.
Un autre système étudie les variations de flexion et donne l'équation de la courbe à son point zéro.

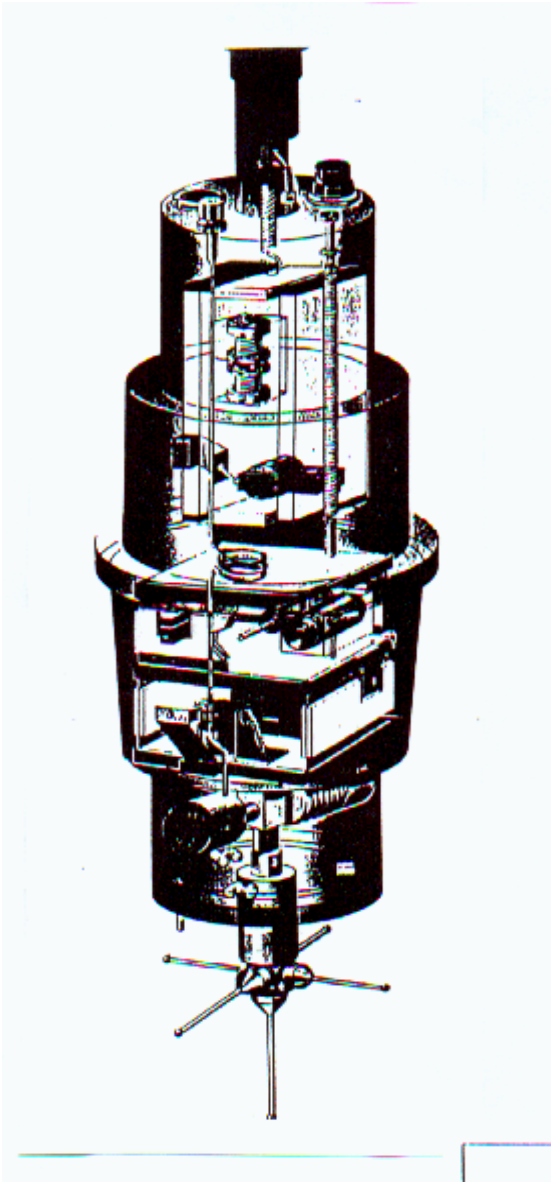


fig n°A 3 Tête mesurante de Leitz

Une des premières machines à tête mesurante (figure n°A5) et de haute précision, mais de capacité de mesure limitée (500 mm au cube) a été réalisée par la société Zeiss (UMM500)
Sa forme est dérivée directement des machines à pointer utilisées dans la mécanique de haute précision.

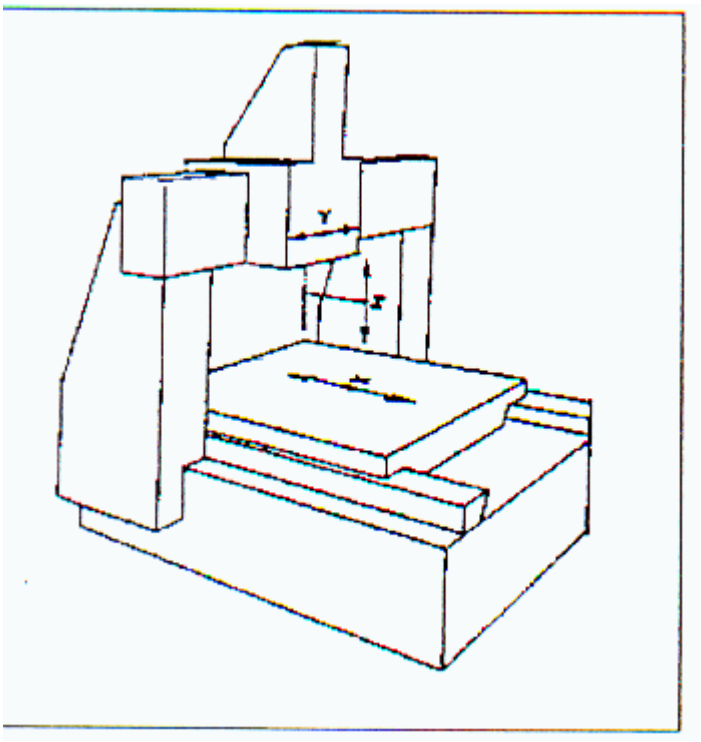


fig n°A 4 La machine à table coulissante développée par la société LEITZ

Un autre constructeur, la société Leitz, a développé le concept de la table mobile (figure n° A4), qui outre une plus grande capacité de mesure, évite les défauts de marche en «crabe » constaté sur les machines classiques de type portique.
Le principe d'Abbe, souligné par Patrice Chollet est dans ce cas mieux appréhendé car la règle des X est située au centre, et du fait d'un portique fixe, le phénomène de" marche en crabe" est minimisé.

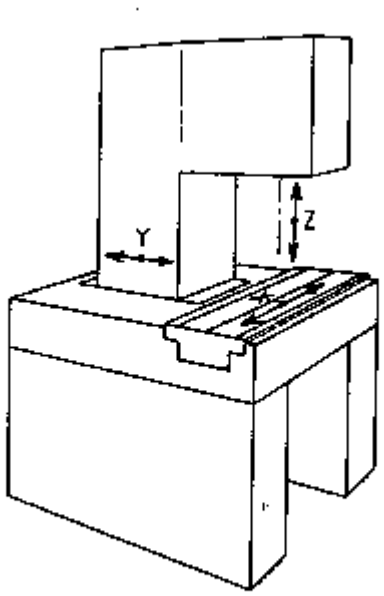


Figure 4

fig n°A 5 La machine UMM 500 de la société ZEISS

Mais le constructeur le plus ancien pour les machines de précision reste la société SIP à Genève.
Car il est à l'origine des machines à pointer et de l'adaptation directe des bâtis en fonte pour la réalisation de ses machines.
Ces machines du troisième type, grâce à une technologie très performante, restent dans des incertitudes très faibles, permettant de respecter des capabilités très suffisantes pour des contrôles de qualité 6 (voire mieux). **[16], [17]**
Mais bien souvent le coût d'un tel investissement est un frein pour une entreprise moyenne.
La précision de telles machines réside aussi bien dans les qualités géométriques des guidages que dans la haute technicité des têtes de mesures.
Les têtes mesurantes sont beaucoup plus fidèles mais aussi nettement plus lentes que les têtes dynamiques à déclenchement.
Quelques rares constructeurs se partagent un marché très restreint lié principalement au coût d'investissement très lourd.
Seules quelques grosses entreprises et des laboratoires de haut niveau métrologique possèdent ce type de matériel.

1-1-2-Conclusion :

Actuellement, les machines que l'on rencontre le plus dans les entreprises sont les machines de deuxième type, sont les machines à portique.

1-1-2-Constitution d'une machine à mesurer :

Les différents éléments qui constituent une machine de type portique sont :

1) Un marbre en granit ou en diabase qui a l'avantage d'être un matériau qui a une grande durée de vie et qui ne s'oxyde pas.
Sa masse volumique, de l'ordre de 2.8, en fait un support lourd et résistant. Il s'usine facilement et résiste aux chocs modérés. Il peut s'écailler, mais cela n'altère pas ses qualités géométriques. De plus il se nettoie facilement avec des produits à base d'éthanol.
2) Des appuis avec semelles élastiques qui ne transmettent pas les vibrations du sol.
Certaines machines de haute précision sont montées directement sur une dalle flottante.
3,4,5) Trois règles en acier (x, y, z) montées quelquefois flottantes sue le marbre afin de pouvoir se dilater indépendamment du marbre (les coefficients de dilatation linéiques étant différents).

acier:$(11.5.10^{-6}.C^{-1})m$ marbre$(7.5.10^{-6}.C^{-1})m$

6) Un portique en marbre ou en matériau plus léger qui se déplace sur le marbre avec des patins aérostatiques (pour les machines récentes).
7) Une traverse en marbre ou en matériau léger comportant un chariot se déplaçant sur des glissières à galets ou sur des patins aérostatiques.
8) Une colonne verticale sur glissières à galets ou sur patins aérostatiques de section carrée ou ronde comportant la tête de palpage et son palpeur.
9) La tête de palpage qui peut être fixe ou orientable.
10) Un palpeur simple, étoile ou disque
11) Un système d'affichage et un **calculateur** complètent le tout.
Certaines machines sont équipées de **magasin de palpeurs,** ce qui permet une automatisation du changement de palpeurs et simplifie les qualifications des différents palpeurs.

De constitution souvent hétérogène, ces machines sont sensibles aux gradients de température que l'on rencontre dans les locaux des services contrôles.

1-1-3- Le contrôle avant l'utilisation des machines à mesurer tridimensionnelle :

Bien avant l'avènement de ces machines, on contrôlait déjà les fabrications.
Tout se faisait sur un marbre, avec un grand nombre d'appareils comme des pieds à coulisse, des micromètres à vis, des comparateurs, des jauges de profondeurs, des cales étalons etc.
Ce travail était long et synonyme d'erreurs toujours possibles pendant les manipulations et les calculs.
Les contrôleurs étaient en général de très bons ouvriers que l'on affectait au contrôle en fin de carrière tant pour leurs connaissances et leur savoir-faire que pour les affecter à des postes moins fatigants.
Leur ingéniosité et leur expérience en contrôle leur permettaient dans la plupart des cas de donner des résultats assez proches de la réalité.

Mais peu d'entreprises possédaient ces ‘’artistes’’ de la mesure et l'expérience se perdait à leur départ.
De plus ces opérations de contrôle étaient longues et tributaires des méthodes employées par les opérateurs.
Les incertitudes de mesure étaient importantes, mais d'ailleurs qui s'en souciait ? .
Les incertitudes de mesures, dès que le contrôle en série s'est avéré obligatoire, ont été un obstacle majeur à une métrologie fiable et de bonne qualité.
La création des MMC (Machines à Mesurer par Coordonnées) avec palpeurs dynamiques à déclenchement a permis de simplifier les contrôles.

1-1-4-Avantages des MMC sur le contrôle sur marbre :

Pas de dégauchissage des pièces sur la table donc gain de temps et facilité pour créer le référentiel pièce imposé par le dessin de définition.
Stockage des informations et des programmes de mesure (meilleure traçabilité et relance immédiate de programme de mesure sans utilisation de montages de contrôle onéreux et pas toujours faciles à stocker).
Matérialisation des éléments virtuels (en contrôle classique, il est très difficile de déterminer un axe, un centre d'alésage, un point intersection de deux axes etc.).
Mesure des pièces en série (mesure en palette avec le même programme de mesure comportant un simple décalage d'origines).
Avec une machine à mesurer tridimensionnelle, les mesures se font directement suivant les trois axes X, Y et Z.
La pièce est fixée sur la table pendant le contrôle.
Le temps d'intervention et de mise en œuvre est beaucoup plus court.
L'informatique associée facilite les calculs, le stockage des résultats et des méthodes de mesure.
Les machines à commande numérique offrent la possibilité de rappeler des gammes de contrôles enregistrées.
Ceci les rend particulièrement adaptées pour le contrôle de pièce en série.
L'opérateur n'intervient alors pratiquement plus après la première série de mesures.

1-1-5- Principe de mesure :

La pièce est posée sur le marbre sans précaution particulière quant à son orientation. Le palpeur de la machine vient au contact de la pièce, détermine un point P dont les coordonnées s'affichent sur l'écran de l'ordinateur.
Ce point P correspond au centre de la bille de palpage du palpeur.
Les coordonnées de P sont données dans un premier temps dans le référentiel machine attaché soit à une sphère de référence fixe sur la table, soit à une origine machine pour les commandes numériques.
L'ensemble des points palpés permet de recréer mathématiquement des éléments géométriques de base qui constituent une pièce mécanique.

Ces éléments géométriques de base sont :
Point, droite, plan, sphère, ellipse, cylindre, cercle, cône, tore.
Ces éléments sont des éléments géométriquement parfaits définis mathématiquement.
En réalité, les surfaces réalisées en production comportent inévitablement des défauts de forme, d'orientation et de position ainsi que des défauts d'états de surface.

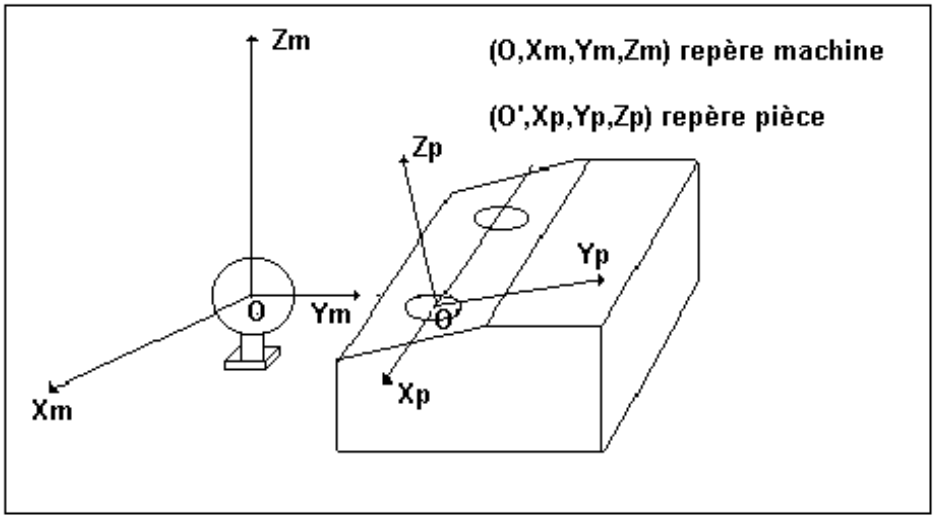
Les calculs de chaque élément font appel à des calculs basés sur le calcul des moindres carrés ou une autre méthode d'optimisation spécifique comme la " méthode Tchébyshef ".

Certains de ces éléments font partie du repère défini par le dessinateur.
Il est possible à tous moments de générer un référentiel conforme au dessin de définition et de calculer les positions relatives des autres éléments par rapport à ceux faisant partie du repère.
Les calculs mathématiques de changement de repère sont la base de l'utilisation des machines 3D.

1-1-6-Avantages de l'alignement par calcul mathématique :

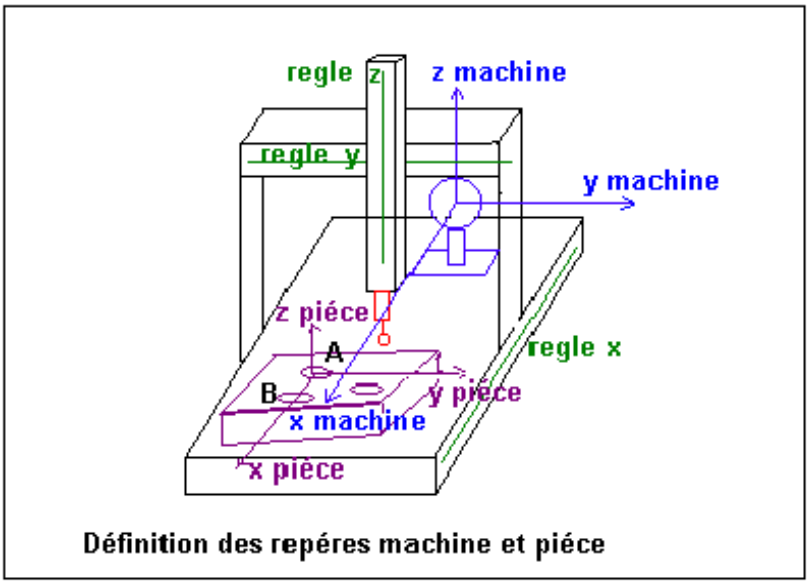
Les premières machines de mesure tridimensionnelle étaient des adaptations des machines à pointer.
Ces machines, équipées de règles de grande précision, sont utilisées pour faire du contrôle en coordonnées cartésiennes.
Dans les premières machines, la difficulté majeure était d'aligner les pièces de forme prismatique par rapport aux axes machines. Une fois la pièce alignée, la tête de palpage qui n'était en fait qu'un simple cône était déplacée à l'intérieur d'un des alésages ce qui donnait la position du 1er trou, le deuxième trou était défini de la même manière et par différence on avait les coordonnées de chacun des trous.
La référence était souvent un des champs de la pièce que l'on venait palper avec une pinnule de centrage de rayon connu.
Actuellement, grâce aux têtes de palpage statiques ou dynamiques et l'aide des calculateurs on n'a plus à dégauchir les pièces.
Cela se fait mathématiquement par un changement de repère (ou de référentiel).
Le calculateur définira la distance O,O'(3 translations) et les trois rotations pour passer du repère machine au repère pièce. (fig n°A6)
Suivant le nombre de points palpés sur un élément, un premier calcul définira un repère local à l'aide du nombre minimum mathématique de points et le repère définitif par le torseur des petits déplacements. **[43].**

fig n°A 6 repère machine et repère pièce



Le principal intérêt du dégauchissage mathématique est le gain de temps car il n'est plus nécessaire d'aligner avec précision la pièce par rapport aux axes machines.
Il est toutefois recommandé de respecter approximativement les axes X pièce avec X machine, les Y pièce avec Y machine et les Z pièce avec Z machine, cela évitera des erreurs lors de la lecture et l'interprétation des résultats en fin de mesure(notamment pour les angles)
Il faut donc bien étudier le dessin avant de positionner la pièce sur la machine.
Exemple de mesure d'une pièce sur une machine 3D.
La figure n°A7 montre la définition des repères lors de la mesure d'une pièce.
Le référentiel machine formé par les axes machine (0,Xm,Ym,Zm) possède une origine en 0 qui le centre de la sphère de référence.
Le référentiel pièce (0',Xp,Yp,Zp) est défini par son origine qui est le centre de l'alésage A projeté dans le plan supérieur de la pièce et les deux axes Zm (normal à ce plan) et Xm qui est l'axe passant par les deux centres projetés de A et B.
La base du repère pièce est ainsi définie.
Le calculateur permettra de recalculer tous les points (stockés dans le repère machine) dans le repère pièce.

fig n°A 7 Mesure d'une pièce sur la machine.



Définition des repéres machine et piéce

La mesure des différents éléments implique de déterminer un nombre de points minimum à mesurer pour chaque élément géométrique de base.
Une partie importante traitera de ce chapitre en traitera, car beaucoup d'erreurs peuvent être commises et la précision du résultat de la mesure de ces éléments dépend en partie du nombre de points choisis et d'autres facteurs dont nous parlerons plus loin.
Un exemple suit sur l'influence du nombre de points pris en compte dans l'évaluation des coordonnées du centre alésage.

Exemple:
Influence sur la position du centre d'un alésage calculé à partir d'un nombre différent de points (fig n°A8).
L'anamorphose de la forme d'un alésage (erreurs de forme amplifiées) est représentée ci-dessous.
Les coordonnées du centre mathématique calculé à partir de trois points (minimum mathématique) ou avec un nombre plus important (14 points) peuvent donner des résultats sensiblement différents suivant le choix des points palpés.

C1et C2= Centres définis avec 3 points (1,1,1 et 2,2,2) pris au hasard.
CM= Centre défini avec 14 points répartis sur la périphérie et calculé par la méthode des moindres carrés.

.

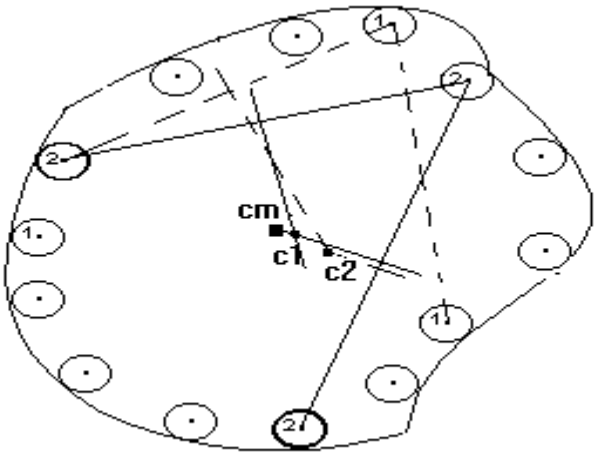


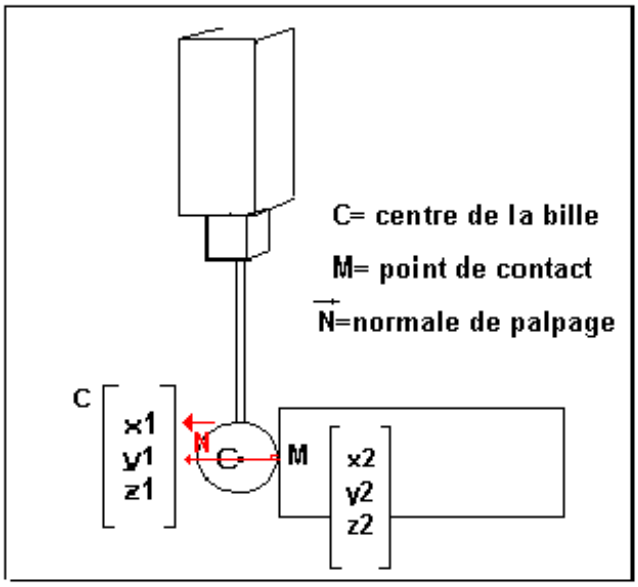
fig n°A 8 Différence sur la position du centre suivant le nombre de points mesurés

On voit sur ce schéma l'influence des localisations des palpages et du nombre de points pris en compte dans le calcul.
Il est donc nécessaire de déterminer les coordonnées du centre avec un nombre significatif de points pour tenir compte des erreurs de forme de la pièce.

1-1-7-Qualification palpeurs :

Dans une mesure, la machine donne les coordonnées du centre de la bille de palpage.
Chaque point appartenant à un élément géométrique de base doit être le point de contact palpeur pièce et non pas le centre de la bille.
Il faut donc connaître le rayon de la bille.
Mais le rayon pris en compte est le rayon dynamique, c'est à dire le rayon déterminé lors du mouvement du palpeur et non le rayon réel.
Chaque mesure serait entachée d'une erreur importante si on ne connaissait pas la valeur du rayon dynamique du palpeur.
Cette qualification prend en compte la vitesse, donc le retard au déclenchement, le sens de palpage et l'angle d'accostage. (figure n°A9 et n°A10)
En effet, ce ne sont pas les coordonnées du centre de la bille du palpeur que l'on doit connaître mais le point de contact réel palpeur / pièce.

fig n°A 9 Coordonnées palpeur et coordonnées du contact palpeur / pièce



Dans le cas de mesure sur des surfaces d'orientation quelconque, il est nécessaire de connaître la direction de la normale de palpage.
Le logiciel recalcule le point P par rapport au centre C de la bille de palpage.

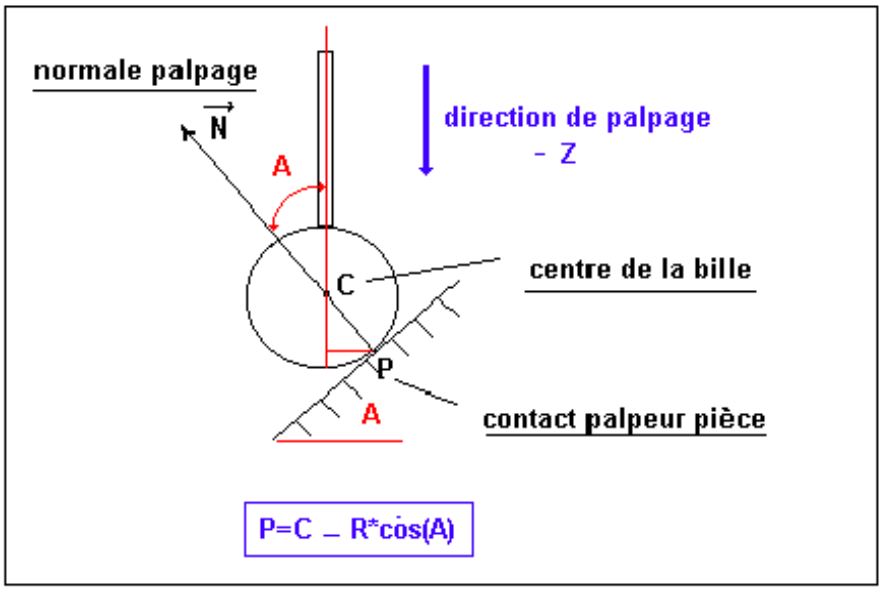


fig n°A 10 Influence de la normale de palpage (figure n°A11)

Dans un repère donné, le calcul du point réel de contact se fera à partir des cosinus directeurs de la normale de palpage déterminée à l'aide d'un nombre significatif de points donnant l'orientation de la surface mesurée.
Nous voyons dans ce cas toute l'importance du choix du nombre de points pour avoir la normale la plus représentative de la surface mesurée.

Méthode de calcul de la normale de palpage :
La normale **n** (provisoire)est déterminée à partir des deux vecteurs donnés par les points 1,2,3 qui sont les trois premiers points de la mesure du plan.
Le produit vectoriel entre **V1** et **V2** donne la normale **n** et la suite des points 4,5,6,7 donne le plan "réel" et ses cosinus directeurs et la normale **n'** issus du calcul du plan des moindres carrés.

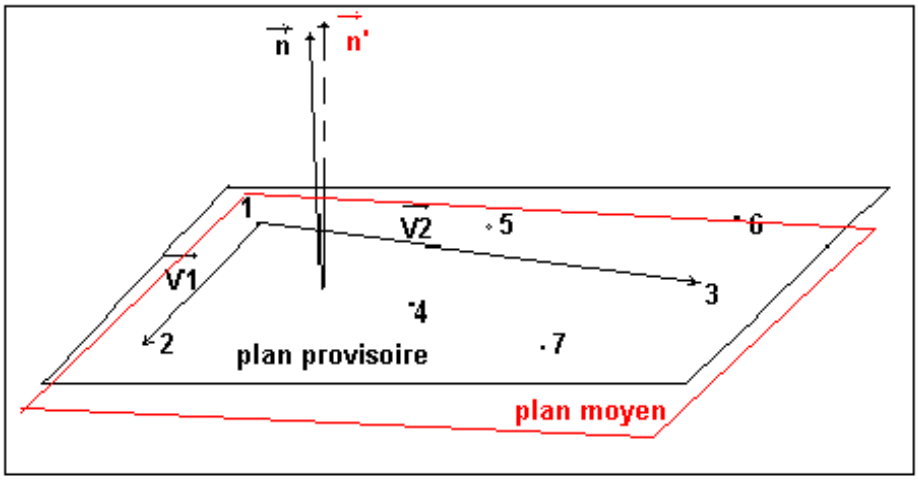
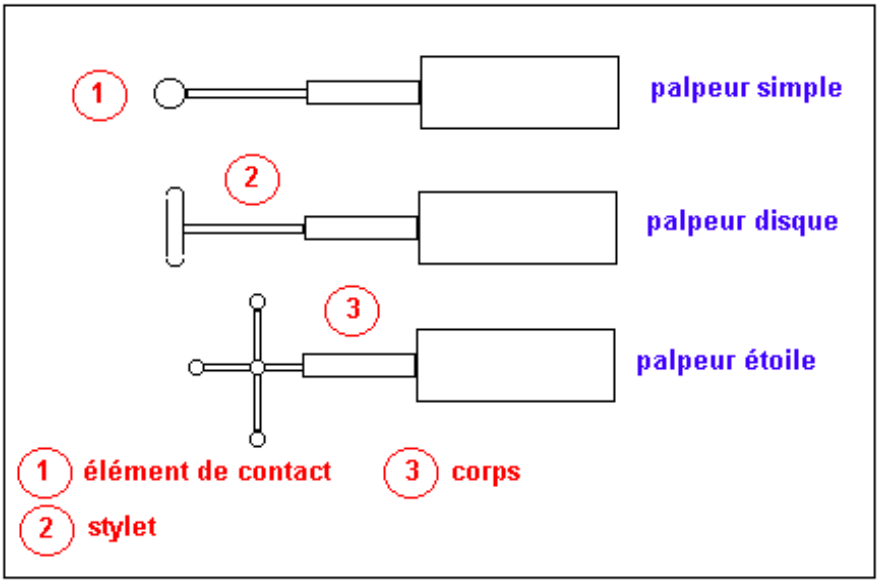


fig n°A 11 Normale provisoire et normale définitive

1-1-8-Différents types de palpeurs :

Il existe un grand nombre de palpeurs adaptés aux surfaces à mesurer (voir schéma n° 3-1-8).
On peut les classer en trois grandes catégories :
Les palpeurs simples qui sont les plus utilisés.
Les palpeurs disques pour des mesures très spécifiques comme les mesures de grands diamètres.
Les palpeurs étoile, pour les grands diamètres et les mesures dans des plans différents.
Un palpeur comprend (fig n° A-12) :
Le corps en carbure ou en matériau composite.
Le stylet, de diamètre plus réduit.
La bille de palpage en rubis synthétique ou en carbure.



L'utilisation de palpeur étoile (figure n°A13) permet de mesurer des alésages dans des plans différents.
Mais si on dispose d'une tête de palpage orientable il est préférable d'effectuer ces mesures avec celle-ci car les erreurs sont moins importantes, la qualification des différents palpeurs d'une touche étoile multipliant les sources d'erreurs, donc des incertitudes bien souvent incompatibles avec une mesure de précision.

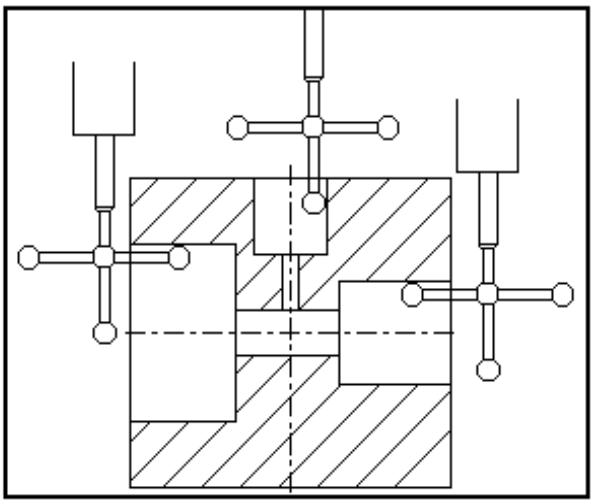


fig n°A 13 Exemple d'utilisation du palpeur étoile

Quelques palpeurs utilisés : (tableau n°A1)
Ces différents palpeurs font partie du coffret de base proposé avec la tête PH9 de Rénishaw utilisée lors de nos mesures.

tableau n°A 1 Palpeurs utilisés

N°	**TYPE de palpeur**	**DIAMETRE de bille mm**	**DIAMETRE du stylet mm**	**LONGUEUR du stylet mm**
1	simple	1	0,5	10
2	simple	2	1,5	10
3	simple	3	2,5	10-20
4	simple	4	3	10-20-30-40-50
5	simple	5	3	20-30-40-50
6	étoile	5 x 2	1,5	15-30

Exemple de dimensions d'un palpeur simple utilisé :

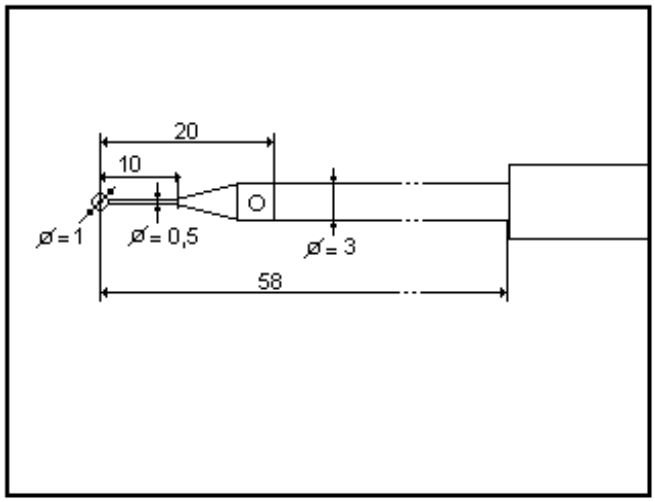
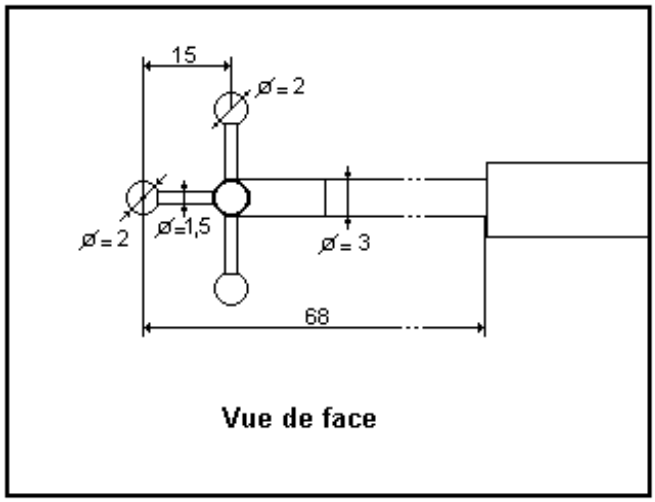


fig n°A 14 Le palpeur de diamètre 1 longueur stylet 10mm

Palpeurs étoile :



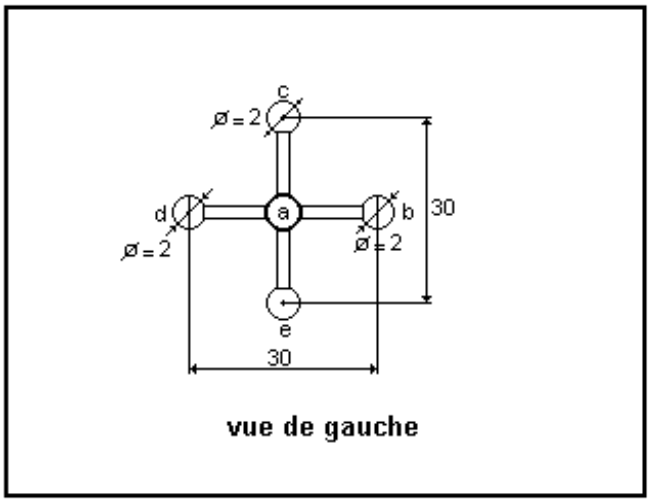


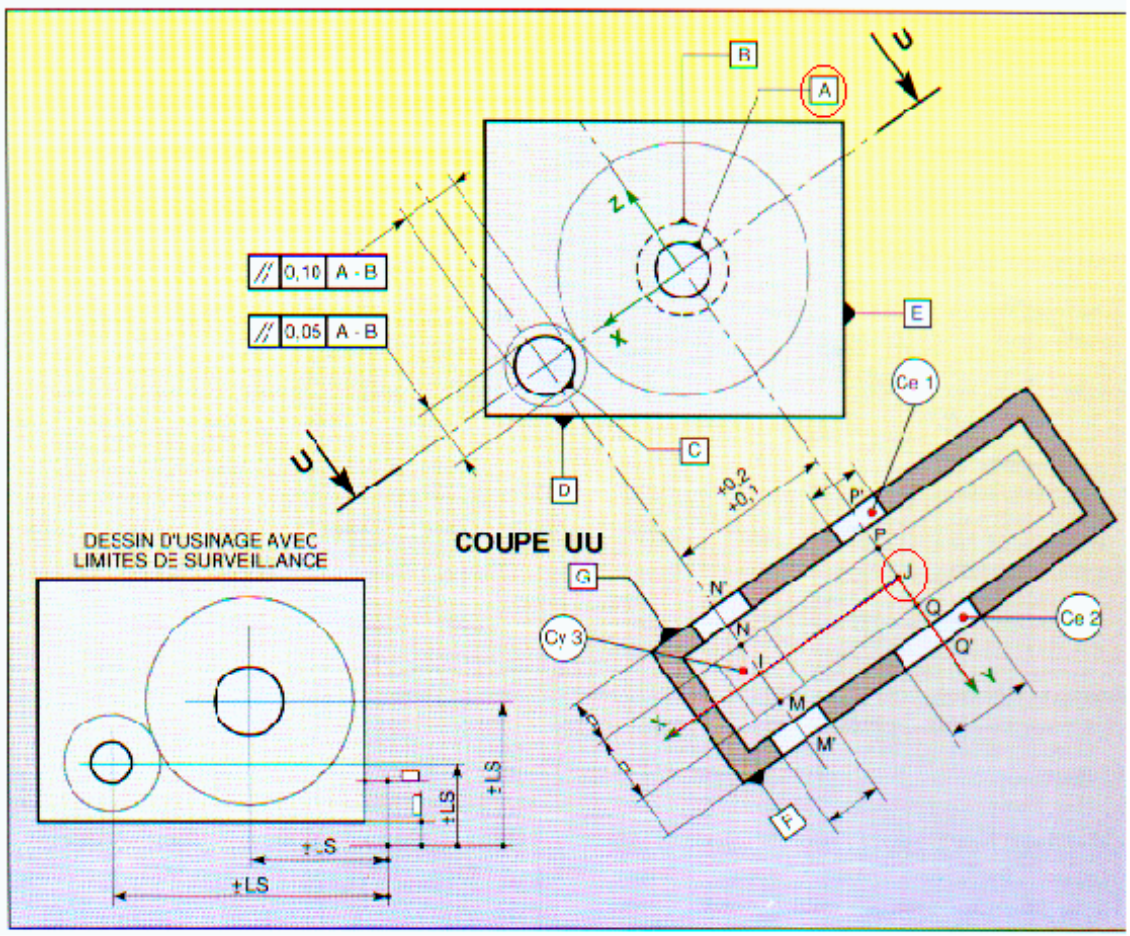
fig n°A 15 Le palpeur étoile de diamètre 2 longueur 68

Le choix des différents palpeurs est fonction des diamètres ou de la grandeur des surfaces.
Les palpeurs simples sont les plus couramment utilisés, mais pour des alésages de grande longueur et de grand diamètre, les palpeurs étoiles voire les palpeurs disques seront d'une grande utilité.
On est quelquefois amené à utiliser des rallonges mais il faut savoir que dans ce cas les incertitudes sont largement supérieures aux incertitudes sans rallonge .

Le choix et la qualification du ou des palpeurs étant réalisés, il est nécessaire de définir les différentes opérations et calculs pour mesurer la pièce.

1-1-9-Type de calculs effectués à l'aide des moyens informatiques de la machine.

L'intérêt de l'utilisation des machines à mesurer est multiple.



Pour définir le référentiel de mesure fonctionnel (0,x,y,z) localisé en J, il était impossible de ne pas passer par des éléments virtuels comme l'axe Y passant par le centre des cercles A et B, l'axe X perpendiculaire à Y et passant par J, la construction des plans NP et MQ ainsi que le plan médian **[25]** etc.
Seules des constructions géométriques à l'aide des moyens informatiques permettent ce type de contrôle.

Méthode:
A chaque élément mesuré ou construit on affecte un numéro de mémoire qui permettra de les rappeler par la suite.
Grâce au calculateur on peut déterminer par calcul :

- Les éléments géométriques de base (point, droite, plan...)
- Les dimensions (diamètres, longueurs...)
- Les défauts de forme (planéité, circularité...)
- Les défauts de position (parallélisme, perpendicularité...)
- Les distances (entre droites, entre plans...)
- Les intersections (entre droites, entre plans ...)
- Les angles (entre droites, entre plans ...)
- Les constructions

La sortie des procès verbaux de mesure et le stockage des résultats seront facilités par l'informatisation et la traçabilité nécessaire dans la mise en place des ISO 9000 sera parfaitement assurée.
La diversité des constructeurs fait que chaque machine possède son logiciel de traitement et de programmation, l'apprentissage à l'utilisation de ces machines demande du temps et beaucoup d'attention.
Mais la difficulté majeure est de traduire les spécifications Bureau d'études en contrat de mesure réalisable par la machine.

Actuellement, il est même possible d'écrire des gammes **hors ligne** sur des postes extérieurs à la machine et donc et donc ne pas mobiliser la machine pour des opérations qui ne sont pas véritablement du contrôle et même pour certains logiciels directement à partir des dessins de définition (CAO ou CFAO).
Mais cela demande une compatibilité entre logiciels et des investissements importants.

Nota: La plupart des machines actuelles fonctionnent à partir d'icônes qui facilitent la réalisation des gammes de contrôle. Mais leur relative convivialité ne doit en aucun cas supprimer les analyses détaillées des spécifications des dessins de définition au risque de donner des résultats ne correspondant pas réellement à l'objectif recherché.

1-1-10-Conclusions.

Tous les logiciels de traitement actuels se ressemblent, mais il existe encore des problèmes de compatibilité entre les différents langages entre qui ne sont pas à l'heure actuelle réglés entre les différents constructeurs de machines à mesurer.

Par exemple, chez les constructeurs automobiles qui utilisent des machines de marques et d'anciennetés différentes, il leur est très difficile de transcrire directement des programmes d'une machine à l'autre.
Il existe bien des possibilités de transfert de fichiers (comme les fichiers de type DMIS) mais il ne s'agit pas d'une réelle standardisation qui reste encore à faire.

1-2-1- La machine utilisée

La machine utilisée est une machine motorisée du deuxième type à portique de marque DEA. (figure n°A17)
Le modèle de la machine utilisée est une gamma 1101 de la société Brown et Sharp.
Elle est équipée d'une tête orientable PH9 avec palpeur dynamique à déclenchement Rénishaw et le logiciel de traitement est le logiciel Tutor sous Windows.
La capacité de mesure est de :
700mm en X
500mm en Y
400 mm en Z



fig n°A 17 la machine DEA utilisée (modèle gamma 1101)

.

Les possibilités de mesure de cette machine sont :

a) La mesure directe :

Les opérations de contrôle sont réalisées sans stockage de la procédure de mesure.
Cette méthode, très peu utilisée, ne sert que pour des contrôles occasionnels ou pour se familiariser au début avec les possibilités du logiciel de la machine.

b) La mesure en auto apprentissage :

La gamme de contrôle est réalisée entièrement à partir des icônes du logiciel et les points de trajectoires et de mesure du palpeur sont validés directement par l'opérateur.

c) La mesure hors ligne (off-line) :

La gamme de contrôle est réalisée sur un poste informatique différent de celui dédié à la machine, soit en programmation directe, soit à partir d'un fichier CAO.

1-2-2-Le logiciel utilisé

Le logiciel **Tutor** permet la mesure d'un grand nombre d'éléments de base.
Lors de la réalisation du programme de mesure, il suffit de sélectionner les icônes représentant la mesure à effectuer pour l'intégrer dans l'ordre des opérations.
Voici la page d'écran (n°A18) représentant les icônes du logiciel utilisé lors nos manipulations.

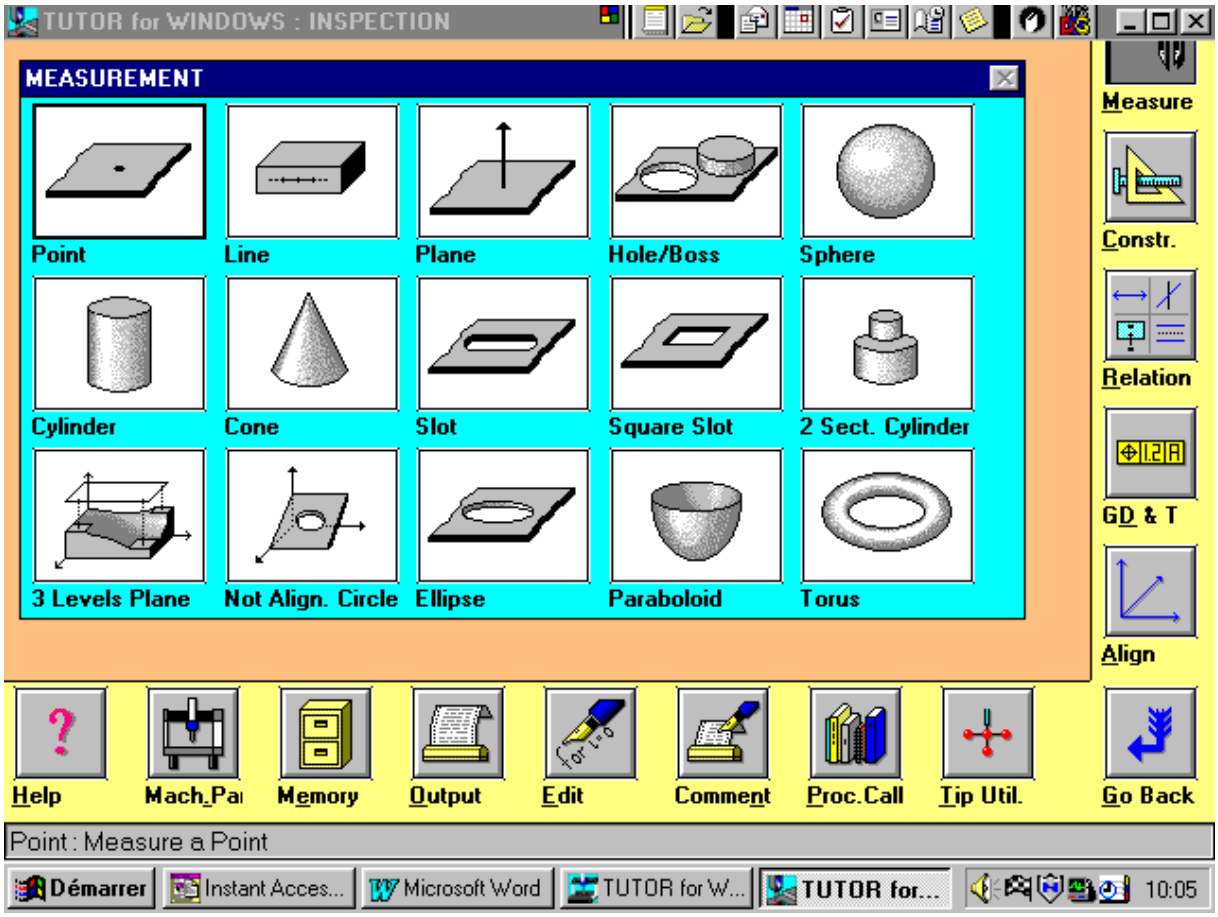


fig n°A 18 Page d'écran des mesures d'éléments de wtutor

Les possibilités de mesure sont :
Mesures d'éléments, constructions, distances, position, création de repères, qualification et rappel de résultats de qualification, appels de procédures spécifiques etc .

1-2-3- Méthode de réalisation d'une gamme de mesure :

Chaque opérateur a sa propre méthode, mais il me paraît important de procéder avec un ordre bien défini pour éviter les retours en arrière toujours préjudiciables à une bonne harmonie de la gamme de contrôle.
La méthode utilisée est la réalisation en off-line de la gamme de contrôle.
Ce qui a pour avantage de ne pas immobiliser la machine, mais nécessitera de valider les points de mesure lors du déroulement des opérations de contrôle sur la machine.
L'ordre proposé dans l'écriture de la gamme de contrôle est le fruit d'une collaboration efficace avec le monde industriel.

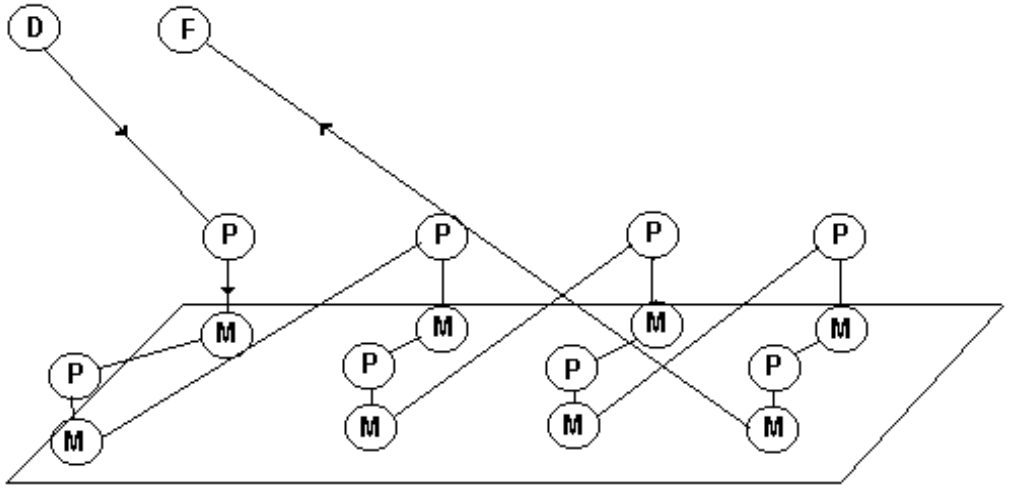
Déroulement:

1) *Définir un nom de fichier par programme de contrôle, ces noms seront stockés puis rappelés à la demande.*
2) *Choisir les opérations à effectuer dans l'ordre défini par une gamme préalablement écrite Sélectionner le capteur ou la position de la tête à partir de la qualification en mémoire ou effectuée en début de gamme de contrôle.*
3) *Déterminer le nombre de points nécessaires à la mesure des différents éléments.*
4) *Ne pas oublier de préciser à la machine le référentiel dans lequel les calculs doivent se faire.*
6) *Activer la page de sortie des résultats suivant les besoins.*
7) *Valider les points de trajectoire et les points de mesure pour pouvoir par la suite lancer le mode CNC.*

Différence entre mode manuel et mode CNC :
Lorsque que l'on est en mode CNC il faut prévoir les points de trajectoire pour éviter les collisions, contrairement au mode manuel ou l'opérateur effectue lui-même les trajectoires.

Exemple:
La méthode de mesure d'un plan en N points est détaillée dans le schéma n°A19

fig n°A 19 Trajectoire du palpeur pour la mesure d'un plan



Le palpeur, dans l'opération de mesure, effectue la trajectoire composée de points de passage (P) et de points de mesure (M).
Les points (P) sont des points de trajectoire (contournement de l'obstacle ou d'approche de la matière) et les points (M) sont les points de contact palpeur/pièce.
(D) est le point de départ et (F) le point de fin de la séquence.
La vitesse de déplacement peut être modulée suivant la nature du déplacement :
Vitesse rapide pour les trajectoires et vitesses lentes pour la mesure.
Les commandes données à la machine seront interprétées dans le référentiel en cours c'est à dire référentiel machine ou référentiel pièce.

Le fichier contenant les points de trajectoire et de mesure s'appelle fichier de points path et comprend les points P ou M, la position de la tête de mesure et le numéro du palpeur utilisé et les coordonnées x, y , z du centre de la bille du palpeur.

Voici un exemple de fichier de points :

P	1	1	0	0	0
P	1	1	x1	y1	z1
M	1	1	x2	y2	z2
P	1	1	x3	y3	z3
M	1	1	x4	y4	z4

etc.

Nota: P= points de passages ou de contournement .
M= points de mesures
Position D =départ
Position F = Fin de séquence
Coordonnées du point 1 (x1, y1, z1)

Mon expérience personnelle m'a permis d'en tirer les avantages et les inconvénients de la réalisation en off-line.

Avantages de la mesure off-line :

1) Un gain de temps appréciable dans la mise au point du programme.

2) L'opérateur après un temps d'adaptation à la syntaxe de l'écriture d'un programme et avec les possibilités actuelles des traitements de texte peut écrire plus rapidement des opérations répétitives .

3) Les points de passage et de mesure sont validés directement sur le boîtier de commande.

4) Les points de contact matière peuvent être calculés avec des routines spécifiques sous forme de boucles informatiques à l'inverse de la prise de points en auto apprentissage ou les points matières sont très aléatoires et ou l'accostage ne se fait pas forcément suivant la normale à la matière.

***Nota** : Certains logiciels de mesure comportent des procédures internes qui facilitent la mise au point des programmes. (voir plus loin)*

En conclusion, c'est la manière la plus élégante de réaliser un programme, car elle permet de préparer une gamme de contrôle en dehors de la machine.

Elle peut être réalisée en mode éditeur avec n'importe quel éditeur de Windows ou par le mode éditeur du logiciel.

L'écriture est réalisée en respectant la syntaxe spécifique au constructeur, mais elle est basée sur des principes communs à tous les logiciels.

Exemple:

On retrouve toujours le type d'opération a effectuer : mpl pour la mesure d'un plan, mcir pour la mesure d'un cercle, etc.

Le numéro de la mémoire où l'élément est stocké MEMORY[10],

Le nombre de points utilisés pour la définition de l'élément,

Le stockage des points matière si c'est nécessaire pour la suite (notamment pour les calculs de position),

Et les points de trajectoire pour les déplacements machine.

La structure du programme comprendra :

Une page d'introduction comportant les déclarations des mémoires, de la taille de ces mémoires, des unités, des mémoires tampons etc.

.

1-1-4-Les parties importantes du programme sont :

1) La mise à zéro des différents référentiels (retour au référentiel machine), ainsi que l'effacement des différents capteurs (positions de la tête et palpeurs).
2) Une opération de qualification ou le rappel en mémoire des résultats d'une qualification mémorisée avec le chemin pour l'atteindre.
Sinon effectuer la qualification palpeur.
Nota: Pour être rigoureux, cette opération est à réaliser systématiquement dans le cas de mesures précises ou à chaque mise en route de la machine et après chaque démontage d'un palpeur.
3) Dans le cas de mesures CNC sur une série de mêmes pièces, on réalisera un référentiel provisoire afin de situer l'élément mesuré par rapport au référentiel machine. En effet tous les points de passage et de mesure sont stockés dans le fichier path et le sont par rapport à ce référentiel. Cette opération sera effectuée en mode manuel sauf utilisation de montages de contrôle.

Dans ce cas, c'est le montage qui sera localisé à l'aide d'un référentiel provisoire.
Toutes les pièces seront mesurées par rapport au montage.
Le référentiel restera constant tant que le montage ne sera pas déplacé.
4)Passage en mode CNC pour la suite des opérations.

Nota: *Lors de la mise au point du programme, cette suite d'opérations sera lancée en mode pas à pas, car l'écriture du programme en mode éditeur ne génère pas les points path et il faut les valider par une approche manuelle ou motorisée. Cela permet de valider ou de modifier les points de contact palpeur/pièce.*
On peut toutefois les écrire en dehors du programme en mode texte, mais c'est une opération demandant beaucoup de maîtrise.
L'utilisation de logiciels sophistiqués permet aussi la réalisation directe de ces points à partir de la CAO.

Condensé du langage utilisé sur la machine utilisée. (Tutor)
Mesure d'éléments :
Mpl (MEMORY [101],6) path PT1
Traduction : mesure d'un plan stocké dans la mémoire 101 par 6 points, le path où sont stockés les points de trajectoire est le path PT1.
mcir (MEMORY [102],8) savepts path PT4
Traduction : mesure d'un cercle stocké dans la mémoire 102 par 8 points, le path où sont stockés les points de trajectoire est le path PT4, de plus les points mesurés (points matière) sont stockés dans un buffer de points en vue d'utilisation future (tracé de forme, localisation etc.).
Icir, Iline, Ipl... Construction d'un cercle, d'une droite, d'un plan etc
Proj, inter, dist_3d... Projection d'élément, intersection, distance dans l'espace etc.
skew1 (MEMORY [5],2, xdir) création de l'axe **x** du référentiel perpendiculaire au plan 5 dans le sens +x, le nouveau repère utilisé est le repère (2).
paral, perpen, angol : mesure de parallélisme, de perpendicalarité, d'orientation etc.

géo_tol (coax,...)(sym,...)(Tp...) : mesure de coaxialité ou de concentricité, de symétrie, de localisation etc.
Nous retrouverons les commandes classiques comme **dy, prn, noprn** etc. qui servent à afficher du texte à l'écran, imprimer, couper l'imprimante...

Le fig n°A-20 représente le début du programme de qualification du palpeur dans les différentes positions de la tête de mesure

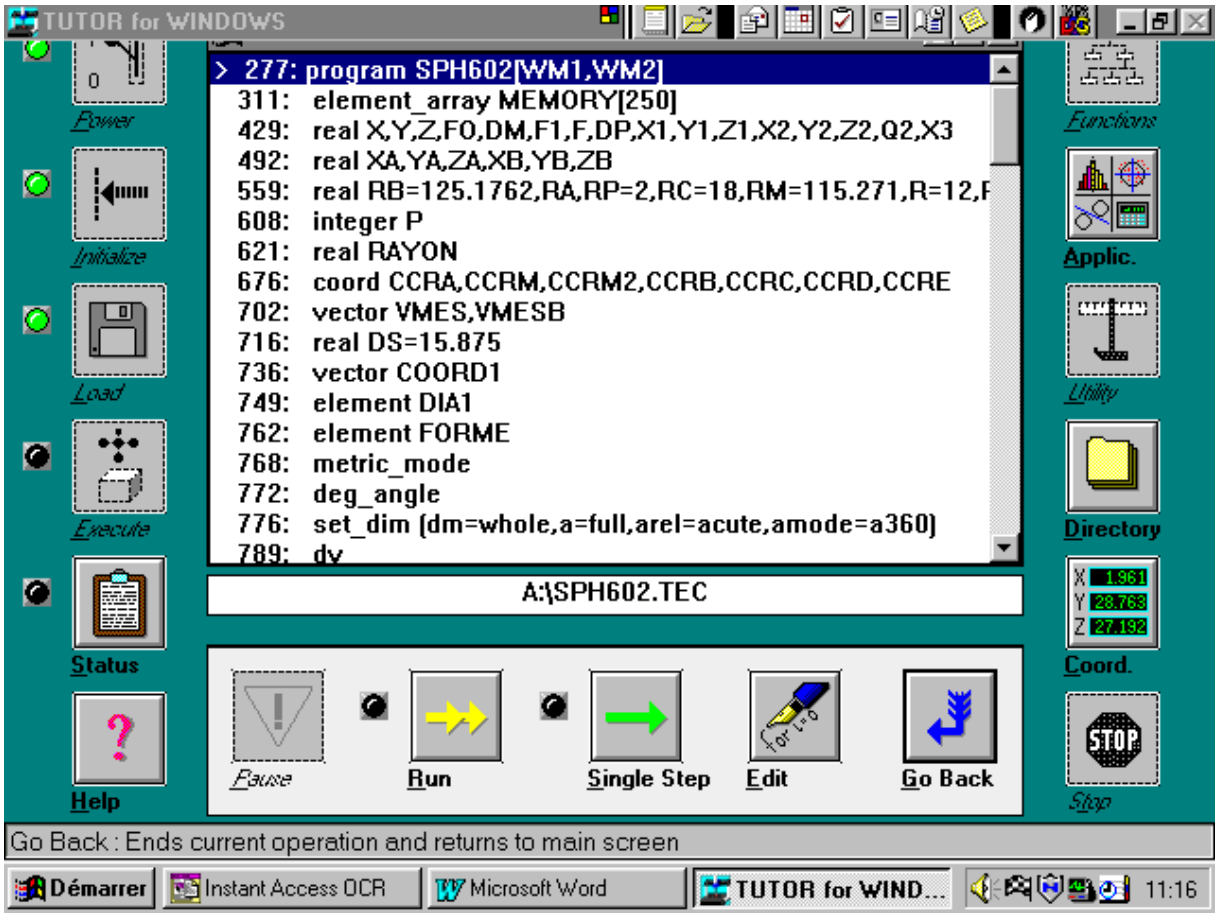


fig n°A 20 Page d'écran d'un programme de wtutor

Les deux schémas suivants (n°A-21 et A-22) permettent de connaître les différents paramètres nécessaires à la mesure du plan et les résultats obtenus.

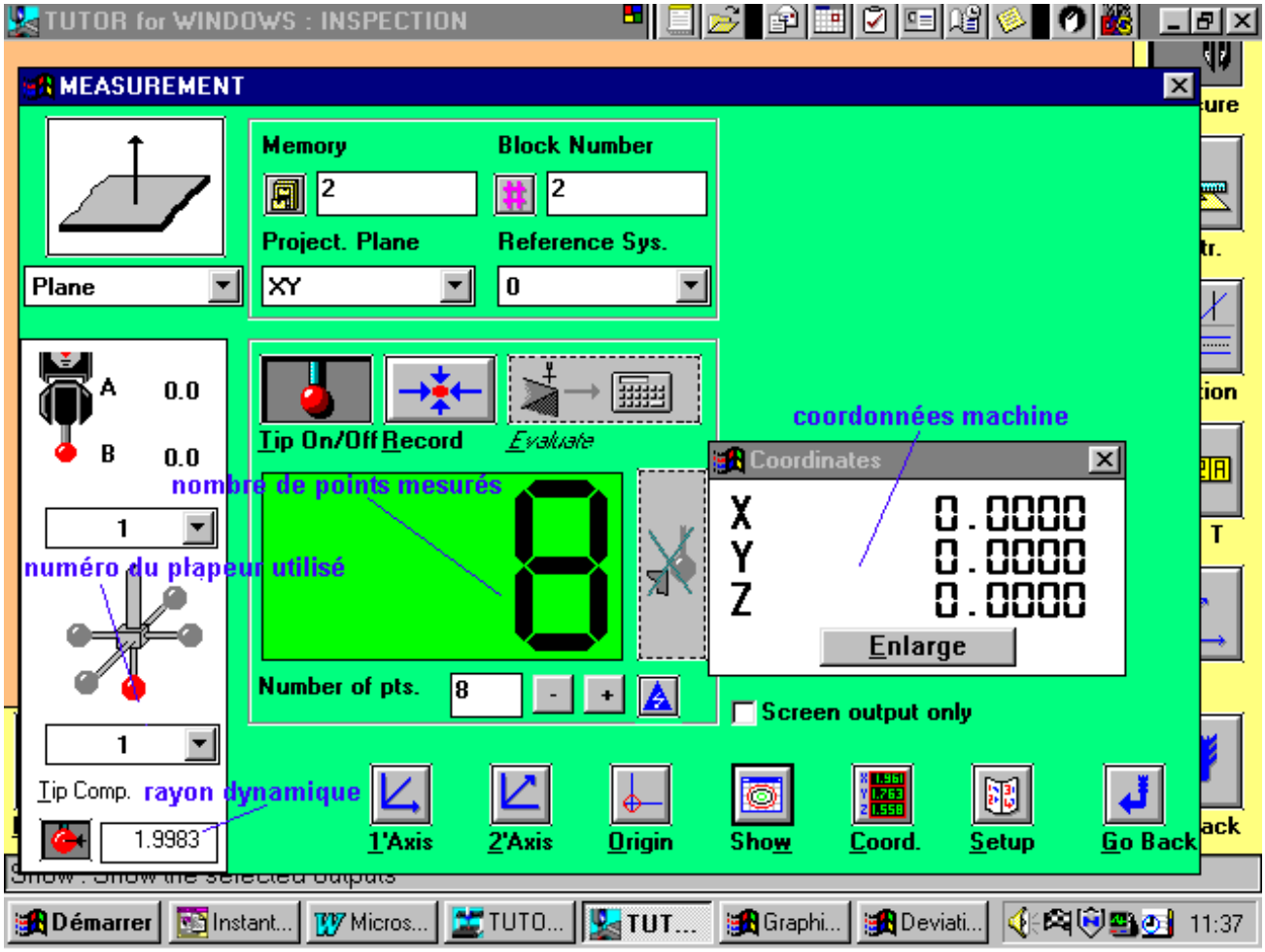


fig n°A 21 Mesure d'un plan en 8 points, avec le palpeur n°1, rayon dynamique 1.9983, la machine est en attente du premier point.

On voit sur cette page d'écran apparaître :
La mesure du plan n°2, le numéro d'ordre (2) du bloc, la représentation de la tête orientable avec les angles (site 0° et gisement 0°), le numéro du palpeur utilisé le (1), le rayon de la constante palpeur(rayon dynamique)=1,9983, le nombre de points mesurés (8), le référentiel courant (0) qui dans ce cas est le référentiel machine, le plan de projection XY et les coordonnées machine.

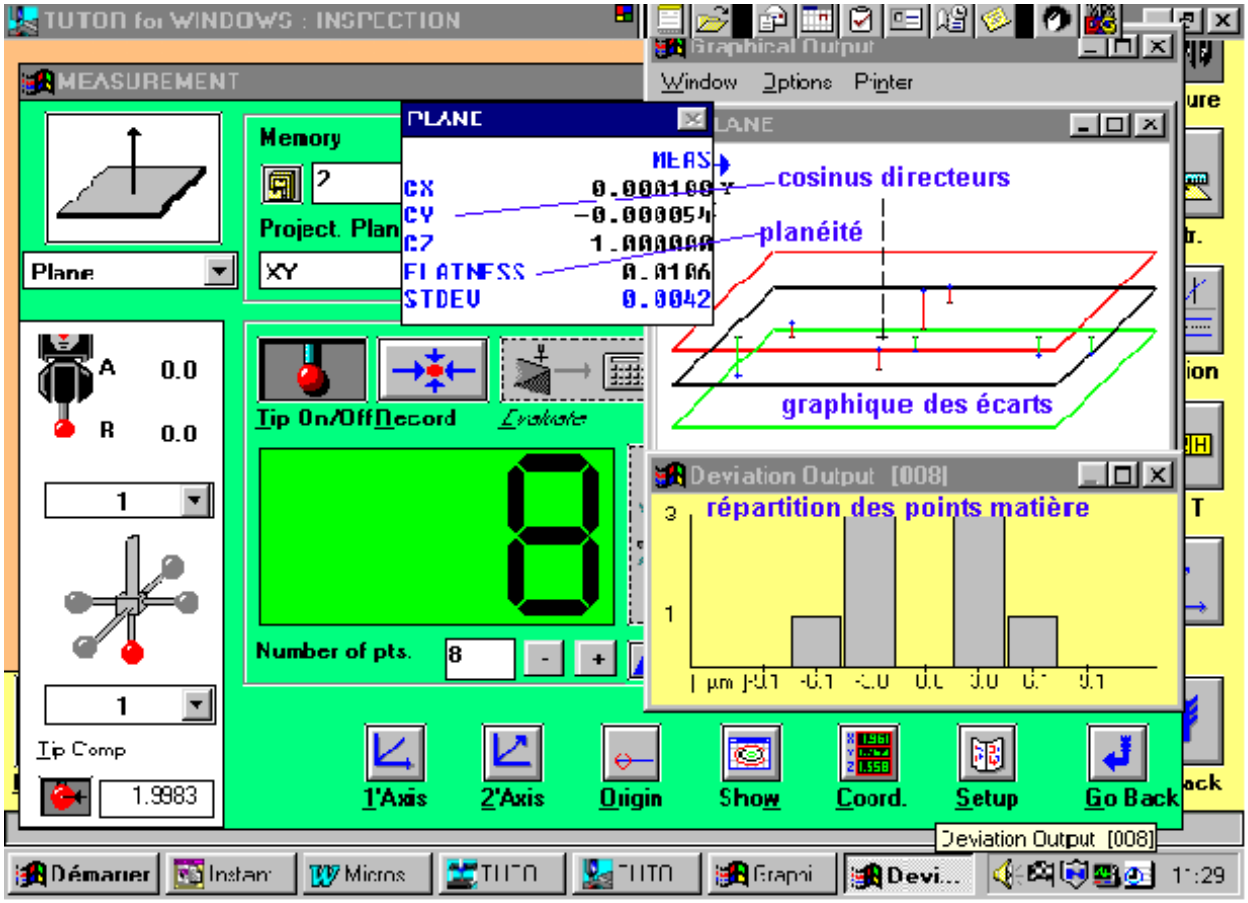


fig n°A 22 Page de résultats de la mesure d'un plan

Pour la mesure d'un plan :
En surimpression dans la fenêtre plane, les cosinus directeurs du vecteur perpendiculaire au plan mesuré (2), la valeur du défaut de planéité, à droite le graphique avec les deux plans enveloppes maximum et minimum parallèles au plan des moindres carrés, la représentation des écarts recalculés, et la sortie avec la répartition en histogramme de ces écarts.
Cette illustration succincte montre les grandes capacités des logiciels actuels.
Il existe d'autres logiciels plus ou moins performants, mais ils sont présentés avec beaucoup de convivialité.
En conclusion, les logiciels actuels permettent de préparer les gammes de mesure en dehors de la machine, mais il faut que le personnel technique soit formé à partir d'une base minimum de connaissances informatiques .
La bonne connaissance des syntaxes, voire le couplage avec la CAO permettent à une entreprise de haute technologie de réaliser les gammes de mesure en liaison directe avec les autres

composantes comme le bureau d’études ou la fabrication avant même l’utilisation de la machine 3D.

Le rôle du métrologue n’en est que plus important, car c’est lui qui va valider les méthodes de vérification et surtout qui devra être l’expert qui confirmera la validité de la procédure et que les ISO 9000 sont appliquées correctement.

En conséquence, un utilisateur de machine à mesurer doit être avant tout formé aux connaissances approfondies de la métrologie.

ANNEXE B

EXTRAIT NORME NFX07-001 DECEMBRE 1994 [19]

2-1-1- Grandeurs et unités

Grandeur :
Attribut d'un phénomène, d'un corps ou d'une substance, qui est susceptible d'être distingué qualitativement et déterminé quantitativement.
Grandeur de base :
L'une des grandeurs qui, dans un système de grandeurs, sont admises par convention comme étant fonctionnellement indépendantes les unes des autres.
Grandeur dérivée
Grandeur définie, dans un système de grandeurs, comme fonction des grandeurs de base de ce système.
Système international d'unité. SI :
Système cohérent d'unités adopté et recommandé par la conférence générale des poids et mesures (CGPM).

7 unités de bases :

tableau n°B 1 Unités de base

grandeur	unité SI de base	
	Nom	Symbole
longueur	mètre	m
Masse	kilogramme	kg
Temps	seconde	s
Courant électrique	ampère	A

Température thermodynamique	kelvin	K
Quantité de matière	mole	mol
Intensité lumineuse	candela	od

Unité (de mesure) de base :
Unité de mesure d'une grandeur de base dans un système donné de grandeurs.

Unité (de mesure) dérivée
Unité de mesure d'une grandeur dérivée dans un système donné de grandeurs.
exemple:

tableau n°B 2 Unités dérivées

grandeur	unité SI dérivée	
	Nom	Symbole
force	newton	N
énergie	joule	J
pression	pascal	Pa

Valeur conventionnellement vraie (d'une grandeur) :
Valeur attribuée à une grandeur particulière et reconnue, parfois par convention, comme la représentant avec une incertitude appropriée pour un usage donné.

2-1-2- Mesurages

Mesure :
Ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer la valeur d'une grandeur.
Métrologie :
Science de la mesure
Note: La métrologie embrasse tous les aspects théoriques et pratiques se rapportant aux mesurages. Quelle que soit l'incertitude de ceux-ci, dans quelque domaine de la science et de la technologie que ce soit.

Principe de mesure :
Base scientifique d'un mesurage.
Méthode de mesures :
Succession logique des opérations, décrites d'une manière générique, mises en œuvre lors de l'exécution des mesurages.
Mode opératoire (de mesure) :
Ensemble des opérations, décrites d'une manière spécifique, mises en œuvre lors de l'exécution de mesurages particuliers selon une méthode donnée.
Mesurande
Grandeur particulière soumise à un mesurage.

2-1-3- Résultats de mesure

Résultat de mesurage :
Valeur attribuée à un mesurande, obtenue par mesurage.

Note:1-lorsqu'on donne un résultat, indiquer clairement si l'on se réfère :
- à l'indication,
- au résultat brut,
- au résultat corrigé,

Et si cela comporte une moyenne obtenue à partir de plusieurs valeurs.

2-Une expression complète d'un résultat de mesurage comprend des informations sur l'incertitude de mesure.

. Indication (d'un instrument de mesure)
Valeur d'une grandeur fournie par l'instrument de mesure.

. Résultat brut :
Résultat d'un mesurage avant correction de l'erreur systématique.

. Résultat corrigé :
Résultat d'un mesurage après correction de l'erreur systématique.

Exactitude de mesure (erreur de justesse) :
Etroitesse de l'accord entre le résultat d'un mesurage et une valeur vraie du mesurande.

Répétabilité (des résultats mesurages) :
Etroitesse de l'accord entre les résultats de mesurages successifs du même mesurande, mesurages effectués dans la totalité des mêmes conditions de mesure.
Notes:
1) Ces conditions sont appelées **conditions de répétabilité**.
2) les conditions de répétabilité comprennent :
- même mode opératoire,
- même observateur,
- même instrument de mesure utilisé dans les mêmes conditions,
- même lieu,
-répétition durant une courte période de temps.

3) La répétabilité peut s'exprimer quantitativement à l'aide des caractéristiques de dispersion des résultats.

Reproductibilité (des résultats de mesurages) :
Etroitesse de l'accord entre les résultats de mesurages du même mesurande, mesurages effectués en faisant varier les conditions de mesure.
Notes:
1) pour qu'une expression de reproductibilité soit valable, il est nécessaire de spécifier les conditions que l'on fait varier.
2) les conditions que l'on fait varier peuvent comprendre :
- principe de mesure
- méthode de mesure,
- observateur,
- instrument de mesure,
- lieu,
- conditions d'utilisation
- temps.

3) La reproductibilité peut s'exprimer quantitativement à l'aide des caractéristiques de dispersion des résultats
4) Les résultats considérés sont habituellement les résultats corrigés.
Obtenue ci-après des modifications des paramètres précédents, c'est l'étroitesse des résultats entre deux séries de mesurages.

Ecart type expérimental :
Pour une série de n mesurages, grandeur s caractérisant la dispersion des résultats donnée par la formule :

$$s = \sqrt{\frac{\Sigma(xi - \overline{x})^2}{n-1}}$$

xi étant le résultat de l'ième mesurage et $\overline{x}$ la moyenne arithmétique des n résultats considérés.

note:
Ecart type expérimental de la moyenne :

$$\frac{s}{\sqrt{n}}$$

Appelé écart type expérimental de la moyenne.
Incertitude de mesure :
Paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande.
Erreur de mesure :
Résultat du mesurande moins une valeur vraie du mesurande.
Erreur relative :
Rapport de l'erreur de mesure à une valeur vraie du mesurande.
Erreur aléatoire :
Résultat d'un mesurage moins la moyenne d'un nombre infini de mesurages du même mesurande, effectués dans des conditions de répétabilité.
Erreur systématique :
Moyenne qui résulterait d'un nombre infini de mesures du même mesurande effectuées dans les conditions de répétabilité, moins une valeur vraie du mesurande.
Correction :
Valeur ajoutée algébriquement au résultat brut d'un mesurage pour compense une erreur systématique.
Facteur de correction :
Facteur numérique par lequel on multiplie le résultat brut d'un mesurage pour compenser une erreur systématique.

2-1-4- Instruments de mesure

Instrument de mesure- Appareil de mesure :
Dispositif destiné à être utilisé pour faire des mesurages, seul ou associé à un ou plusieurs dispositifs annexes.

Transducteur de mesure
Dispositif qui fait correspondre à une grandeur d'entrée une grandeur de sortie selon une loi déterminée.
Chaîne de mesure
Suite d'éléments d'un appareil de mesure ou d'un système de mesure qui constitue le chemin du signal de mesure depuis l'entrée jusqu'à la sortie.
Système de mesure
Ensemble complet d'instruments de mesure et d'autres équipements assemblés pour exécuter des mesurages spécifiés.
Appareil de mesure(à affichage)analogique
Appareil de mesure pour lequel le de sortie ou l'affichage est une fonction continue du mesurande ou du signal d'entrée.
Appareil de mesure(à affichage)numérique
Appareil de mesure qui fournit un signal ou un affichage sous forme numérique.
Capteur :
Elément d'un appareil de mesure ou d'une chaîne de mesure qui est directement soumis à l'action du mesurande.
Echelle(d'un appareil de mesure)
Ensemble ordonné de repères avec toute chiffraison associée, formant partie d'un dispositif indicateur d'un appareil de mesure.
Cadran
Partie fixe ou mobile d'un dispositif d'affichage qui porte la ou les échelles.
Calibrage(d'un instrument de mesure) :
Positionnement matériel de chaque repère(éventuellement de certains repères principaux seulement) d'un instrument de mesure en fonction de la valeur correspondante du mesurante.
Ajustage(d'un instrument de mesure) :
Opération destinée à amener un instrument de mesure à un état de fonctionnement convenant à son utilisation.
Réglage(d'un instrument de mesure) :
Ajustage utilisant les moyens mis à disposition de l'utilisateur.

2-1-5- Caractéristiques des instruments de mesure.

Calibre
Etendue d'échelle que l'on obtient pour une position donnée des commandes d'un instrument de mesure.
Intervalle de mesure :
Module de différence entre les limites d'une étendue
Etendue de mesure :
Ensemble des valeurs du mesurande pour lesquelles l'erreur d'un instrument est supposée comprise entre les limites spécifiées.
Sensibilité

Quotient de l'accroissement de la réponse d'un instrument de mesure par l'accroissement du signal d'entrée.

Mobilité (seuil) :

Variation de la plus grande variation d'un signal d'entrée qui ne provoque pas une variation détectable de la réponse de l'instrument, la variation du signal d'entrée étant lente et monotone.

Résolution(d'un dispositif de mesure) :

La plus petite différence d'indication d'un dispositif afficheur qui peut être perçue de manière significative.

Dérive :

Variation lente d'une caractéristique métrologie d'un instrument de mesure.

Classe d'exactitude :

Classe d'instruments de mesure qui satisfont à certaines exigences métrologiques destinées à conserver les erreurs dans les limites spécifiées

Erreur d'indication(d'un instrument de mesure)

Indication d'un instrument de mesure moins une valeur vraie de la grandeur d'entrée correspondante.

Erreur de justesse(d'un instrument de mesure)

Erreur systématique d'indication d'un instrument de mesure :

Note: L'erreur de justesse est normalement estimée en prenant la moyenne de l'erreur d'indication sur un nombre approprié d'observations répétées.

Justesse(d'un instrument de mesure) :

Aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications exemptes d'erreur systématique.

Fidélité (d'un instrument de mesure) :

Aptitude d'un instrument de mesure à donner des indications très voisines lors de l'application répétée du même mesurande dans les mêmes conditions de mesure Erreur systématique d'indication d'un instrument de mesure

2-1-6- Etalons

Etalon

Mesure matérialisée, appareil de mesure, matériau de référence ou système de mesure destiné à définir, réaliser, conserver ou reproduire une ou plusieurs valeurs d'une grandeur pour servir de référence.

Etalon international

Etalon reconnu par un accord international pour servir de base internationale à l'attribution de valeurs aux autres étalons de la grandeur concernée.

Etalon national

Etalon reconnu par une décision nationale, dans un pays, pour servir de base internationale à l'attribution de valeurs aux autres étalons de la grandeur concernée.

Etalon secondaire :

Etalon dont la valeur est fixée par comparaison avec un étalon primaire de même grandeur.

Etalon de travail :

Etalon qui est utilisé couramment pour étalonner ou contrôler des mesures matérialisées ou des appareils de mesure ou des matériaux de référence.

Etalon de transfert :
Etalon utilisé comme intermédiaire pour comparer entre eux des étalons.
Traçabilité :
Propriété d'un résultat de mesurage ou d'un étalon tel qu'il pourra être relié à des références déterminées, généralement des étalons nationaux ou internationaux par l'intermédiaire d'une chaîne ININTERROMPUE de comparaisons qui ont toutes les incertitudes déterminées.
Etalonnage :
Ensemble des opérations établissant, dans des conditions spécifiées, la relation entre les valeurs indiquées par un appareil de mesure ou d'un système de mesure ou les valeurs représentées par une mesure matérialisée ou par un matériau de référence, et les valeurs correspondantes de la grandeur réalisée par des étalons.
Conservation d'un étalon :
Toutes les opérations nécessaires à la préservation des caractéristiques métrologiques d'un étalon dans des limites convenables.

ANNEXE C

3-1-UTILISATION DES STATISTIQUES :

3-1-1- Introduction

Un opérateur sur machine à mesurer se contente dans la plupart des cas d'une seule mesure de la spécification pour valider ou non la pièce.
Les normes NFE 02-204 (voir annexe E) donnent une approche de la méthode d'acceptation des produits en fonction de l'intervalle de tolérance et de l'incertitude de mesure.
Mais pour définir une incertitude de mesure, il faut d'abord connaître la valeur "vraie" du mesurande (Vocabulaire annexe A).
Pour cela il faut un grand nombre (n) de mesures et la valeur supposée vraie est donnée par l'estimateur de la moyenne qui est l'estimateur de l'espérance mathématique d'une population..

3-1-2- rappels sur les notions de probabilité [36]

Soit une épreuve (E) et deux événements (A) et (B) résultats associés à (E).
Répétons l'épreuve N fois et supposons que l'événement (A) ait été réalisé n fois.

$$f(A) = \frac{n(A)}{N}$$

$$0 \leq f(A) \leq 1$$

La fréquence f(A) est égale à
La fréquence f(A) est comprise entre 0 et 1
On aura f (A)= 1 si elle est réalisée à chaque épreuve et f (A) = 0 si elle n'est jamais réalisée.
Si la réalisation de (A) est incertaine, (due au hasard), en réalisant n épreuves, on obtiendra des fréquences f(A), f'(A), f "(A) qui sont différentes.
Toutefois, si le nombre N augmente, la fréquence f (A) se stabilisera et tendra vers P(A), quand N est infini.
C'est la probabilité de l'appartenance d'un résultat de l'épreuve (E) au sous-ensemble (A) ou plus simplement probabilité de (A).

Application pour la mesure :
Chaque fois que l'on effectue une épreuve, on obtient une valeur numérique définie de X notée x.

Une variable aléatoire est **discrète** lorsque son ensemble fondamental comprend un nombre fini ou infini dénombrable de valeurs possibles.
Elle est **continue** lorsqu'elle peut prendre toutes les valeurs situées dans un intervalle donné fini ou infini.

3-1-3-Fonction de répartition et densité de probabilité :

Soit une variable **discrète** X pouvant prendre les valeurs numériques xi pour i=1,2,3,. n.
A chaque résultat numérique possible xi on associe un nombre p (xi) tel que P (X=xi) qui est la probabilité de l'événement.

$$p(x_i) \geq 0$$

Et

$$\sum_{i=1}^{\infty} p(x_i) = 1$$

C'est la fonction de répartition ou fonction cumulative.

$$F(x) = \sum_{xi \leq x} p(x_i) = P(X) \leq x)$$

On peut donc calculer la probabilité de l'événement

$$a \leq X \leq b$$

Pour une variable aléatoire **continue,** la **densité de probabilité** est une fonction f(x) ayant les propriétés suivantes :
Pour deux valeurs numériques x1 et x2 quelconques telles que

$$x1 \neq x2$$

Alors :

$$P(xi \leq X \leq x2) = \int_{x1}^{x2} f(x)dx$$

Et la fonction de répartition d'une variable aléatoire continue est donnée par :

$$P(X < x) = F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(t)dt$$

La relation entre la densité de probabilité et la fonction de répartition est donc :

$$f(x) = \frac{d}{dx} F(x)$$

A condition que F(x) soit différentiable.

densité de probabilité uniforme.

Si X est une variable aléatoire continue ayant une densité de probabilité uniforme dans l'intervalle m - h/2 et m+h/2
on obtient (figure 4-1-1) pour

$$m - \frac{h}{2} \le x \le m + \frac{h}{2}$$

la densité de probabilité f(x) représentée par la figure n° C1

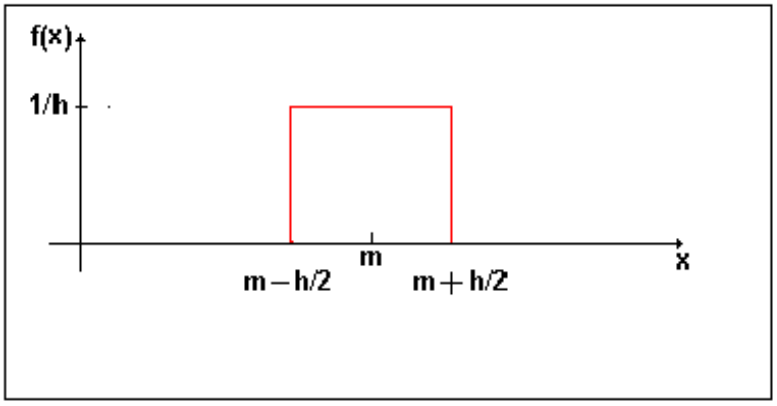


fig n°C 1 densité de probabilité

et la fonction de répartition F(x) devient (figure n°C2)

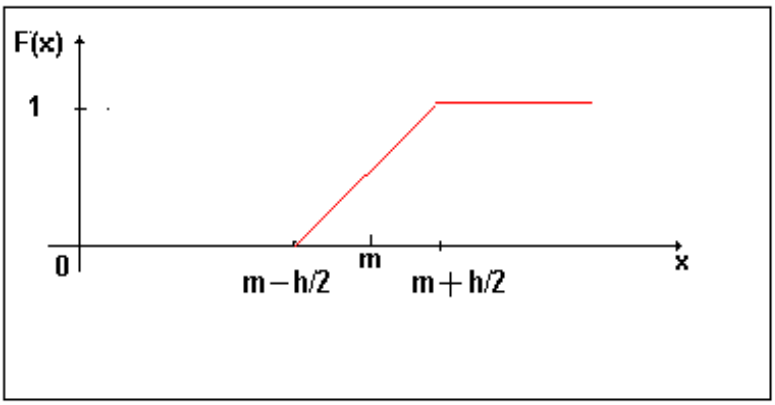


fig n°C 2 Fonction de répartition

Loi normale et loi normale réduite **:**
La loi normale N (μ , σ^2), dépend des deux paramètres μ et σ^2.

La formule générale de la densité de probabilité est :

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}^{\exp -1/2\frac{(x-\mu)^2}{\sigma}}$$

La formule de la fonction cumulative est :

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-1/2\frac{(x-\mu)^2}{\sigma})dx$$

En changeant la variable

$$u = \frac{(x-\mu)}{\sigma}$$

La formule devient :

Densité de probabilité de la loi normale réduite : $\boxed{y = f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\frac{-u^2}{2}}$

La fonction cumulative de la loi normale réduite est donnée par la figure n° C3

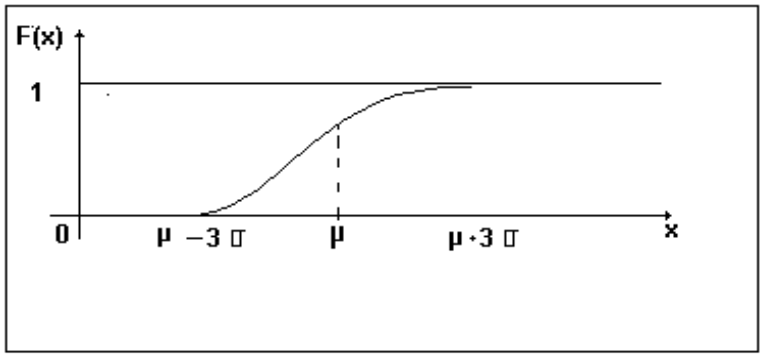


fig n°C 3 Fonction de répartition (ou cumulative) de la loi normale réduite

Et la densité de probabilité par la figure n°C4

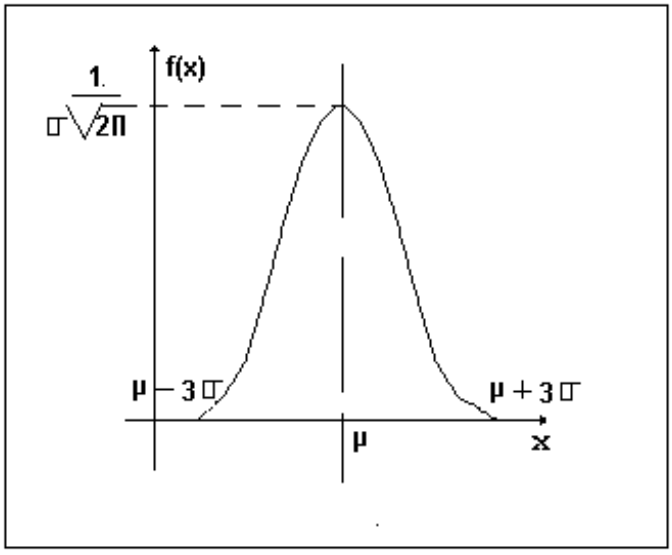


fig n°C 4 Densité de probabilité de la loi normale réduite

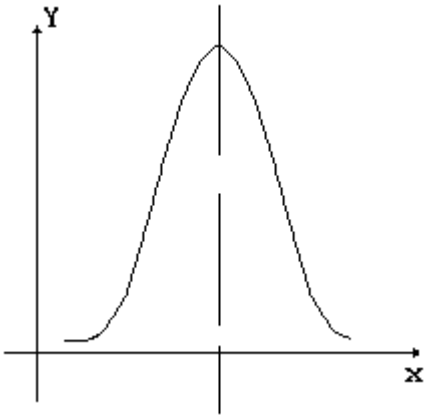
3-1-4-Application:

Outre le contrôle des fabrications, les statistiques sont très utilisées dans les calculs d'incertitudes de mesure.
Plusieurs lois régissent les distributions de variables comme la loi uniforme, la loi dérivée d'arc sinus, mais la principale est la loi normale.

La loi normale dite loi de LAPLACE GAUSS est la loi qui régit les variations de nombreux paramètres physiques.
Elle est applicable lorsque les dispersions de la variable sont dues à **l'influence de nombreux paramètres indépendants les uns des autres et dont les effets s'additionnent.**

Tout phénomène ayant un caractère systématique doit être extrait des résultats, sauf si celui-ci (ou ceux-ci) ne sont pas significatifs ou ne sont pas connus.

Le tableau utilisant la loi normale vue précédemment comportant la figure n°C5 et l'équation de cette loi est donnée ci-dessous.



$$y(x) = \frac{1}{\sigma(x)\sqrt{2\pi}}^{\exp 1/2\frac{(xi-\mu)^2}{\sigma(x)}}$$

où

σ(x) = sigma = écart type (paramètre de dispersion)
μ = espérance mathématique des variables de la population
x = valeur de la variable
x ι = valeur particulière de x

fig n°C 5 Loi normale (paramètres)

Les autres lois de distribution comme les lois de distribution uniforme (rectangle), de dérivée d'arc sinus, font partie des distributions rencontrées en métrologie.
La loi uniforme régie l'erreur de quantification des appareils de mesure et loi d'arc sinus pour les variations de température dans un système de climatisation.
Nous ne nous intéresserons pour l'instant qu'à la normale.

3-1-5-Méthode de calcul pour l'utilisation de la loi normale réduite : [33]

Pour des raisons de simplifications, on utilise plutôt la **loi normale réduite** (figure n°C6) ou $\overline{m}$ devient l'origine, et, dans ce cas, la fonction devient :

$$y = f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}^{\exp\frac{-u^2}{2}}$$

équation de la loi normale réduite centrée

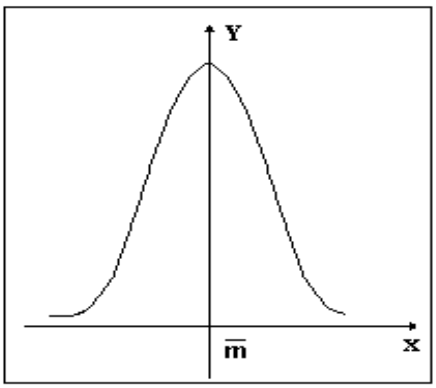


fig n°C 6 équation de la loi normale réduite centrée

Application (figure C7)
Notation pour la suite des calculs : f(x)=f(u)
F(x)= u

La totalité de l'aire de la courbe donne une probabilité égale à **1** dans l'intervalle de la courbe entre

$$-\infty et +\infty$$

Exemple: pour une valeur particulière de u=1, on aura :

$$f(u) = 0.2419 \qquad u = \frac{Xi - \overline{m}}{\sigma} = 1$$

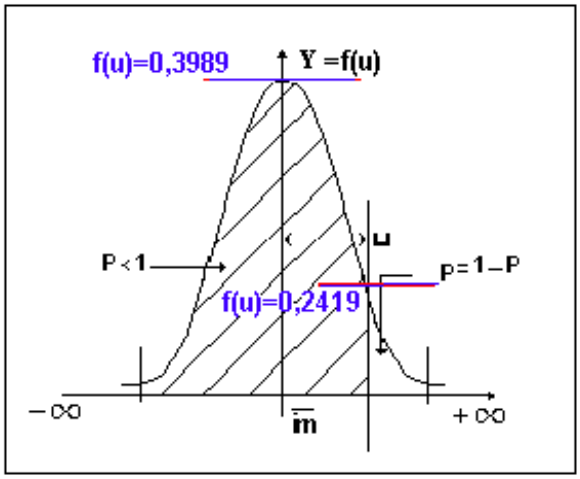


fig n°C 7 calcul de la densité de probabilité

Développement:
pour u = 1

$$y = f(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-u^2}{2}$$

$$\exp \frac{-u^2}{2} \Rightarrow 0.6065$$

$$\sqrt{2\pi} = 2.5066283$$

$$\frac{0{,}6065}{2.5066} = 0{,}2419 \cong 0{,}242$$

donc f(u)= 0.242

De même pour $u = 0 \Rightarrow 0{,}3989$

pour $u = 0{,}5 \Rightarrow 0{,}3521$ *etc*…

3-1-6- Densité de probabilité de la loi normale réduite

Pour éviter les calculs, le tableau n° C1 donne les valeurs de la densité de probabilité pour u=0 à u= +4

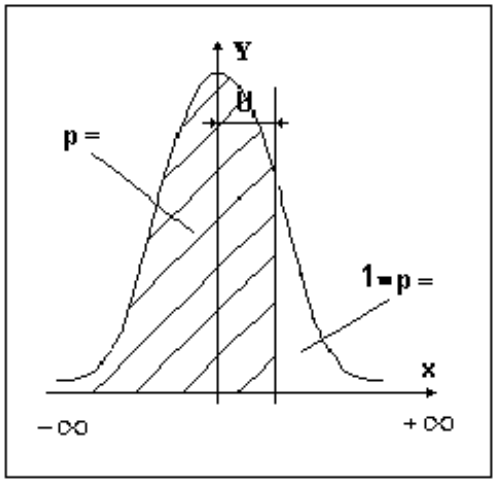
tableau n°C 1 calcul de la densité de probabilité de u = 0 à u = 4

u(i)	f (u)	Différence ((ui-(ui+1))de la densité pour les valeurs de (u) -1E-04
0,0	0,3989	- 19
0,1	0,3970	- 60
0,2	0,3910	- 96
0,3	0,3814	- 131
0,4	0,3683	- 162
0,5	0,3521	- 189
0,6	0,3332	- 209
0,7	0,3123	- 226
0,8	0,2897	- 236
0,9	0,2661	- 241
1,0	0,2420	- 241
1,1	0,2179	- 237

1,2	0,1942	- 228
1,3	0,1714	- 217
1,4	0,1497	- 202
1,5	0,1295	- 186
1,6	0,1109	- 169
1,7	0,0940	- 150
1,8	0,0790	- 134
1,9	0,0656	- 116
2,0	0,0540	- 100
2,1	0,0440	- 85
2,2	0,0355	- 72
2,3	0,0283	- 59
2,4	0,0224	- 49
2,5	0,0175	- 39
2,6	0,0136	- 32
2,7	0,0104	- 25
2,8	0,0079	- 19
2,9	0,0060	- 16
3,0	0,0044	- 11
3,1	0,0033	- 9
3,2	0,0024	- 7
3,3	0,0017	- 5
3,4	0,0012	- 3
3,5	0,0009	- 3
3,6	0,0006	- 2
3,7	0,0004	- 1
3,8	0,0003	- 1
3,9	0,0002	- 1
4,0	0,0001	

Ce calcul est intéressant si nous voulons tracer la courbe sur un écran de calculateur ou sur une table traçante.

Mais avant tout l'important est de trouver la Probabilité P (figure n°C8) pour une valeur particulière de u. On calcule dans ce cas-là l'aire de la surface hachurée pour une valeur particulière de u.



e dans une loi normale.

Nous avons vu précédemment que si $u = +\alpha$

$P = 1$

Donc pour $u \neq +\alpha$, on aura :

S (aire de la surface hachurée) = $\int_{-\alpha}^{u} y.dx$

L'aire est calculée à l'aide la table (tableau n°C2 et figure C9) de la fonction de répartition de la loi normale réduite.
Cette table permet de donner instantanément la probabilité de trouver la probabilité de trouver des individus inférieurs ou égaux pour une valeur particulière de U.

3-1-7- Fonction de répartition de la loi normale réduite

(Probabilité de trouver une valeur inférieure à U)

fig n°C 9 loi normale réduite

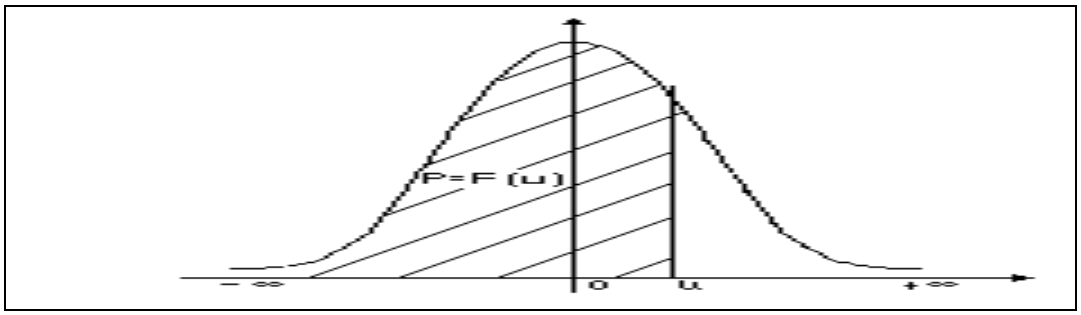


tableau n°C 2 tableau n° C-2 valeur de la probabilité (fonction de répartition) pour une valeur de u

		Table loi normale réduite								
u	**0**	**0,01**	**0,02**	**0,03**	**0,04**	**0,05**	**0,06**	**0,07**	**0,08**	**0,09**
0	0,5	0,504	0,508	0,512	0,516	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,591	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,648	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,67	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,695	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,719	0,7224
0,6	0,7257	0,729	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,758	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7494	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,791	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133

0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,834	0,8365	0,8389
1	0,8413	0,8438	0,8461	0,8485	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,877	0,879	0,881	0,883
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,898	0,8997	0,9015
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	**0,9332**	0,9345	0,9357	0,937	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9632
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9664	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,975	0,9756	0,9761	0,9767
2	0,9772	0,9779	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9803	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,983	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,985	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,989
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,992	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,994	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0, 9959	0,996	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,997	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,998	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986
3	0,99865	0,99869	0,99872	0,99876	0,9988	0,99884	0,9989	0,99891	0,99895	0,99899

Application (figure n°C10)
Une loi normale a pour valeur μ = 25 mm et une variance σ^2=0.0004
L'écart type devient σ (x) = 0.02 mm
Quelle est la densité de probabilité pour x1= 25.03 mm

D'après la table de loi normale Réduite, on aura :

$$u = \frac{x_1 - \mu}{\sigma(x)} = \frac{25.03 - 25}{0.02} = 1.5$$

Probabilité de trouver P = F(u) pour x1 <= 25.03mm
D'après la fonction de répartition de la loi N. réduite

$u = 1{,}5$ $P = f(u) = 0{,}9332$ (valeur en gras dans le tableau n°4-1-2)

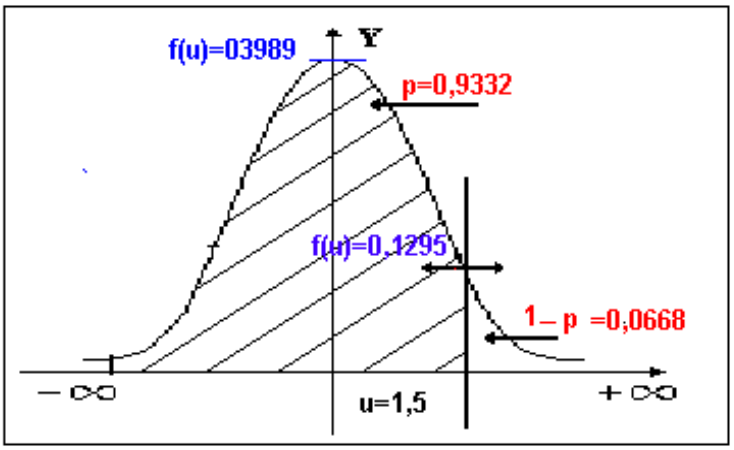


fig n°C 10 valeur de la probabilité pour une valeur particulière x= 25.3mm

Conclusion:
La probabilité de trouver des mesures inférieures ou égales à 25,3mm est de 0,9332 ou 93.32% et pour des mesures supérieures ou égales à 25.03 est de 0.0668 soit 6.68%
Nota: Quand u est négatif, on lit la valeur de u dans la table et on prend son complément (1-valeur lue)

3-1-8-Valeurs particulières importantes :

Dans la plupart des calculs on définit des limites spécifiques comme ±1 σ (x), ±1,96 σ (x), ±3 σ (x),
Utilisation de la loi Normale réduite pour :
tableau n°C 3 Valeurs particulières

Valeurs de U=	P(u)	%
-1	1 - 0.8413	15.77
-1.96	1 - 0.9750	2.5
-3	1 - 0.99865	0.135
+1	0.8413	84.13
-1.96	0.9750	97.50
+3	0.99865	99.865

Pour des intervalles ci dessous, on obtient en pourcentage :

tableau n°C 4 Valeurs pour des intervalles

Intervalle	%
$\pm$ 1 σ (x)	68.26
$\pm$ 1,96 σ (x)	95
$\pm$ 3 σ (x)	99.73

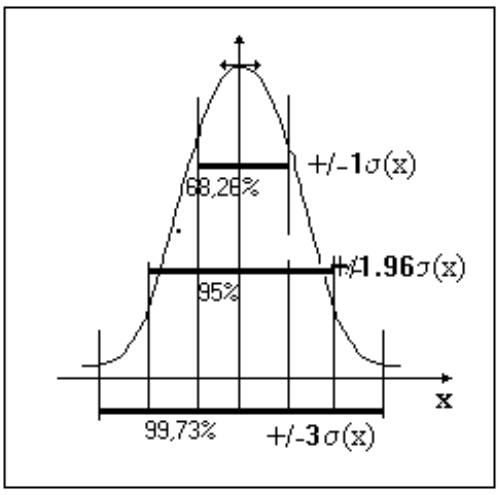


fig n°C 11 estimation en pourcentage pour des valeurs spécifiques

Dans la norme NFE 02-204 (annexe E) on retrouve ce calcul avec k qui s'apparente au niveau de confiance développé ci-dessus.

3-1-9-Calculs de μ ET σ(x) sur une population mère (N)

Ces 2 valeurs caractérisent la courbe de dispersion de la population mère

E(x)= moyenne de la population

μ = *valeur de cette population appelée* ***Espérance Mathématique***

σ(x)=Valeur de l'écart type de la population mère (N)

V(x)=Variance de la population mère (N)

$$\mu = \frac{\sum_{1}^{n} x_i}{N}$$

σ (x) = SIGMA = Ecart type de la population

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\Sigma (x_i - \overline{m})^2}{N}}^{n}_{1}$$

σ(**x**) et V(**x**) sont des paramètres de dispersion

4-1-1-8-Valeurs de m et s sur un échantillon(n)

Estimateur de la moyenne sur un échantillon (n)

$$\overline{m} = \frac{\sum_{1}^{n} x_i}{n}$$

Estimateur de l'écart type sur un échantillon (n)

$$S = \sqrt{\frac{\Sigma (x_i - \overline{m})^2}{n-1}}^{n}_{1}$$

Autre formule plus simple à utiliser (si on ne dispose pas de calculatrice avec fonction SD)

$$S = \sqrt{\sum_{1}^{n} x_i{}^2 - \frac{1}{n}(\sum x_i)^2 \over n-1}$$

Tableau n° C-5 Récapitulatif :

Population (N)	**Echantillon (n)**
Espérance mathématique E(x) Ecart type σ(x) Variance V(x) μ= valeur de la moyenne σ= valeur de l'écart type σ²= valeur de la variance	estimateur de la moyenne $\overline{m}$ estimateur de l'écart type s(x) estimateur de la variance s²(x) Ecart type expérimental de la moyenne $s / \sqrt{n}$

tableau n°C 5 Symboles

ANNEXE D

4-1-1-Incertitudes de mesure :

Estimation caractérisant l'étendue des valeurs dans laquelle se situe la valeur vraie d'une grandeur mesurée.

II) Capabilité des moyens de mesures (voir détails annexe D)

La norme NFE 02-204, donne les règles à respecter pour le choix des instruments de mesure à utiliser en fonction des deux paramètres principaux :

Intervalle de tolérance et incertitude de mesure.

Ce rapport donné par :

$$CMM = \frac{IT}{\Delta\mu}$$ (*CMM* = Capabilité des moyens de mesure)

Cette valeur qui n'est pas normalisée est souvent exigée par les grands donneurs d'ordre avec un minimum de 4.

Mais comment définir la valeur de $\Delta\mu$ pour des chaînes de mesures complexes ?
Est-il toujours possible de respecter cette valeur de 4 ?

Une première approche consiste à utiliser l'erreur intrinsèque d'un appareil :

Erreur intrinsèque : Ei=$\sqrt{Ef^2 + Ej^2}$ ou

Ef = erreur de fidélité

Ej= erreur de justesse.

Voici quelques exemples de tolérances mesurables. avec CMM=3

tableau n°D 1 Tolérance mesurable pour les appareils courants

Types d'instruments	Résolution mm	Classe de précision	Ei	Tolérances mesurables
Pieds à coulisse	**0.02**	**0**	**±0.04**	
Pieds à coulisse	**0.02**	**1**	**±0.05**	
Pieds à coulisse	**0.02**	**2**	**±0.005**	
Micromètre	**0.01**	**0**	**±0.007**	

Micromètre	**0.01**	**1**	**±0.01**	
Micromètre	**0.01**	**2**	**±0.02**	
Comparateur	**0.01**	**0**	**±0.03**	
Comparateur	**0.01**	**1**	**±0.045**	
Comparateur	**0.01**	**2**	**±0.07**	
Colonne verticale	**0.001**	**0**	**±0.006**	
Colonne verticale	**0.001**	**1**	**±0.009**	

Cette première approche permet un choix à priori des appareils adaptés à la tolérance que l'on veut vérifier. Mais raisonner uniquement en erreur intrinsèque de l'appareil utilisé ne donne qu'une idée très subjective du choix final.
Il existe dans une mesure bien d'autres facteurs d'influence permettant un calcul d'incertitude plus conforme à la réalité.

4-1-2- Bilan des erreurs

On peut très schématiquement les classer en : :
- erreur due à l'instrument de mesure
- erreur due aux conditions de mesure
- erreur due aux opérateurs
- erreur due à la pièce à mesurer
- erreur due à une mauvaise communication

1) Erreurs dues à l'instrument de mesure :

Comprend généralement deux types d'erreurs **Justesse et fidélité**
De plus suivant la complexité de l'appareil on pourra trouver la **dérive,** la **géométrie** (rectitude des glissières d'une 3D, la **planéité** du marbre etc.
On rajoutera l'erreur de quantification ou erreur de lecture et l'incertitude de l'étalonnage si on la connaît.

2) Erreurs dues aux conditions de mesure :

On trouve dans ce paragraphe :
La température ambiante, la différence de température entre l'instrument de mesure et la pièce mesurée, la différence entre la pièce mesurée et la température ambiante, la pression atmosphérique, l'hygrométrie, l'incertitude des conditions ambiantes, les vibrations et la propreté des éléments mesurés, etc.

3) Erreurs dues aux opérateurs :

La répétabilité d'un seul opérateur sur un ensemble de mesures et la reproductibilité sur plusieurs opérateurs

4) L'élément mesuré :

Prendre en compte dans ce paragraphe les déformations de la pièce, son défaut de forme et éventuellement son état de surface.

5) erreurs dues à une mauvaise communication :

En amont :

Ce sont les erreurs liées aux relations entre le bureau d'études et la fabrication ou le contrôle.

On trouve les référentiels mal définis, les interprétations différentes d'une cote ou d'une position, les différences de procédure très fréquentes dans les chaînes complexes offrant des choix multiples pour la résolution d'un calcul.

En aval :

Les arrondis de mesures et de calculs ainsi que les erreurs propres aux logiciels (algorithmes, méthodes, etc.). Ces erreurs peuvent être déterminantes dans les chaînes complexes comme 3D, appareils de circularité, états de surface, 3D sans contact etc.

4-1-3-Méthode de calcul des incertitudes [28]

1-Introduction

Globalement, le résultat d'une mesure est :

Résultat d'une mesure = valeur vraie + erreur

Le vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie **(VIM)** définit deux types d'erreurs :

Erreur aléatoire : Elle est liée aux conditions de répétabilité de la mesure.

Erreur systématique : C'est l'écart entre la moyenne infinie de résultats de mesure par rapport à la valeur supposée du mesurande.

Résultat d'une mesure = valeur vraie +erreur aléatoire + erreur systématique

Diminution des erreurs :

On diminue les erreurs aléatoires en **répétant** les mesures et les erreurs systématiques en appliquant des **corrections.**

Les erreurs statistiques(dites aléatoires) :

On admet qu'une série de mesures constitue un échantillon extrait d'une population mère.

A condition que cet échantillon soit représentatif (effectuer des tests de normalité), on pourra calculer les estimateurs de la moyenne et de la variance de cette population.

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum x_i \text{ et} \qquad U^2(x) = \frac{1}{n-1}\sum (x_i - \bar{x})^2$$

L'incertitude type est donnée par $u(x) = \sqrt{U^2(x)}$

l'incertitude composée est $uc(y)$

Avec un facteur d'élargissement k on détermine l'incertitude élargie qui devient

$$U = k\ u_c(y)$$

On prendra généralement k= 2 pour assimiler les résultats à un niveau de confiance de 95 %.

Type des erreurs :

Les erreurs dites systématiques :

Certaines de ces erreurs pourront être définies d'une manière quasi certaine, et dans ce cas feront l'a objet de corrections.

Elles peuvent être de deux types :

Corrections d'étalonnage**(Ce) :** liées directement au certificat d'étalonnage

Corrections d'environnement**(Ca)** : liées à la température, à la pression atmosphérique ou à l'hygrométrie.

Ce qui nous donne si Y est le résultat du processus de mesure

$$Y = \overline{x} + Ce + Ca$$

Incertitudes de mesures :

Les corrections systématiques seront appliquées à la mesure, mais il reste un doute quant à ces valeurs.

En effet, une correction de température de 19 à 20° peut être faite, car on considère qu'une température environnante moyenne est bien de 19°, mais qu'elle est la variation autour de 19° de ce laboratoire ?

Estimation des différentes composantes :[11]

Les 3 composantes seront classées soit en erreurs de type A pour la première et en type B pour les deux autres.

Loi de propagation des incertitudes :

$$u_c{}^2(y) = \sum_{j=1}^{n}\left[\frac{\delta_i}{\delta x_i}\right]^2 u^2(X_i) + 2\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\frac{\delta f}{\delta X_i}\frac{\delta f}{\delta x_j}u(x_i, x_j)$$

Xi et Yi ont pour estimateurs xi et xj et u (xi, xj) est la covariance estimée de Xi, Xj et $uc^2(y)$ est la variance de l'incertitude combinée de y

La formule précédente peut s'écrire :

$$U_c{}^2(y) = \sum_{j=1}^{n}\left[\frac{\delta f}{\delta X_i}\right]^2 u^2(xi) + 2\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\left[\frac{\delta f}{\delta X_i}\frac{\delta f}{\delta X_j}\right]u(X_i)u(X_j)r(X_i, X_j)$$

Et dans le cas ou toutes les covariances sont nulles, c'est à dire que les phénomènes sont indépendants entre eux, la loi de composition des incertitudes devient beaucoup plus simple à écrire car le deuxième terme devient nul.

(r =estimateur du coefficient de corrélation entre les deux paramètres influant sur la mesure)

$$r(x_i, x_{j)} = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i).u(x_j)} = 0$$

Et dans l'équation

$$Y = \overline{x} + C_e + C_a$$

la loi de propagation des incertitudes devient :

$$uc^2(y) = u^2(\overline{x}) + u^2(C_e) + u^2(C_a)$$

et en le mettant sous forme d'écart type :

$$uc(y) = \sqrt{u^2(\bar{x}) + u^2(C_e) + u^2(C_a)}$$

La norme issue d'une recommandation du BIPM (bureau international des poids et mesures), définit en fait deux types d'incertitudes :
Les incertitudes de types A et les incertitudes de type B

4-1-4- Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure

1)Extrait de la norme NFX07-020 (juin 96)

Le terme «incertitude» signifie doute.
Ainsi incertitude de mesure signifie doute pour la validité d'un résultat de mesure.

Incertitude de mesure :
Paramètre associé au résultat de mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient être raisonnablement attribuées au mesurande.
(voir aussi le vocabulaire du VIM, première édition 1984,3.09)

Incertitude type :
Incertitude du résultat d'un mesurage exprimée sous la forme d'un écart type.

Evaluation de type A :
Méthode d'évaluation de l'incertitude par l'analyse statistique de séries d'observations.

Evaluation de type B :
Méthode d'évaluation de l'incertitude par des moyens autres que l'analyse statistique de Séries d'observations.

Incertitude type composé :
Incertitude type du résultat d'un mesurage, lorsque ce résultat est obtenu à partir des valeurs d'autres grandeurs, égale à la racine carrée d'une somme de thermes, ces termes étant des variances ou des covariances de ces grandeurs, pondérées selon la variation du résultat de mesure en fonction de celle de ces grandeurs.

Incertitude élargie :

Grandeur définissant un intervalle, autour du résultat d'un mesurage, dont on puisse s'attendre à ce qu'il comprenne une fraction élevée de la distribution des valeurs qui pourraient être attribuées raisonnablement au mesurande.
Dans le vocabulaire INC-1(1980) cette incertitude élargie est aussi appelée **incertitude globale.**
Facteur d'élargissement :
Facteur numérique utilisé comme multiplicateur de l'incertitude type. (Entre 2 et 3).

2)Méthode de calcul :

Estimation du mesurande :

$$y = f(x_1, x_2, ...x_N)$$

$$y = \overline{Y} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} f(x_1, x_2, ..x_N.k)$$

ou dans la plupart des cas

$$\overline{q} = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n} q_k$$

Evaluation de type A de l'incertitude type :

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1}\sum_{k=1}^{n}(q_k - \overline{q})^2.$$

Evaluation de type B de l'incertitude type :
Pour une estimation xi d'une grandeur d'entrée Xi qui n'a pas été obtenue à partir d'observations répétées, la variance estimée associée u²(xi) ou l'incertitude type u(xi) est évaluée par un jugement scientifique fondé sur toutes les informations disponibles au sujet de la variabilité possible de Xi.
Elles peuvent comprendre :

- des résultats de mesures antérieurs
- l'expérience ou la connaissance de comportement
- les spécifications constructeur
- les données fournies par des certificats d'étalonnage
- l'incertitude assignée par des ouvrages de référence.

Résumé: (hors norme NFX 07-020)
La recommandation INC-1 permet de combiner les différentes composantes de l'incertitude.

2.1) L'incertitude d'un résultat de mesure comprend généralement plusieurs composantes qui peuvent être groupées en deux catégories d'après la méthode utilisée pour estimer leur valeur numérique :

A. celles qui sont évaluées en appliquant des méthodes statistiques à une série de déterminations répétées,

B. celles qui sont évaluées par d'autres moyens.

Il n'y a pas toujours une correspondance simple entre le classement dans les catégories A ou B et le caractère "aléatoire" ou "systématique" utilisé antérieurement pour classer

les incertitudes. L'expression "incertitude systématique" est susceptible de conduire à des erreurs d'interprétation ; elle doit être évitée.
Toute description détaillée de l'incertitude devrait comprendre une liste complète de ses composantes et indiquer pour chacune la méthode utilisée pour lui attribuer une valeur numérique.

2.2) Les composantes de la **catégorie A** sont caractérisées par les variances estimées s_i^2 (ou les écarts types estimés s_i et les nombres v_i de degrés de liberté.
Le cas échéant, les covariances doivent être données.

2.3) Les composantes de la **catégorie B** devraient être caractérisées par des termes uj^2 qui peuvent être considérés comme des approximations des variances correspondances dont on admet l'existence. Les termes uj^2 peuvent être traités comme des variances et les termes **uj** comme des écarts type.
2-4) L'incertitude composée devrait être caractérisée par la valeur obtenue en appliquant la méthode usuelle de combinaison des variances. L'incertitude composée ainsi que ses composantes devraient être exprimées sous la forme "d'écarts type".

2.5) Si pour des utilisations particulières, on est amené à multiplier par un facteur l'incertitude composée afin d'obtenir une incertitude globale la valeur numérique de ce Facteur doit toujours être donnée.

3) Procédure proposée pour l'établissement des formules d'incertitudes dans les opérations d'étalonnage

- Etablir un bilan aussi complet que possible des causes d'incertitudes affectant la méthode d'étalonnage
- Appliquer les corrections des incertitudes à caractère systématique
- Ne pas prendre en compte les causes d'incertitudes liées aux caractéristiques de l'instrument à étalonner. En effet, il s'agit de caractériser une procédure indépendante de cet instrument.

Le laboratoire d'étalonnage devra indiquer ces incertitudes lorsqu'il réalisera l'étalonnage de l'instrument et délivrera un document d'étalonnage

- Evaluer la contribution de chaque composante de l'incertitude :
  . les composantes de **type A** seront estimées en appliquant des méthodes statistiques,
  . les composantes de **type B** seront appréciées en se fondant sur l'expérience. Il est de pratique courante d'apprécier l'incertitude maximale des composantes, dans ce cas **uj** peut être donné par la règle pratique suivante :

$$Uj = \frac{incertitude * Maxi * de * la * composante}{3}$$

- Calculer l'estimation de l'écart type composé :

dans le cas où les composantes pourraient être considérées comme indépendantes, l'écart type composé s'obtient en réalisant une somme quadratique :

$$s = \sqrt{\sum s_i{}^2 + \sum u_j{}^2}$$

NOTA : Dans le cas où un terme fonction du carré de la grandeur mesurée apparaîtrait sous le radical, cela conduit à des expressions compliquées, et afin de simplifier les formules, on pourra employer la règle empirique et approximative suivante :

$\sqrt{A^2 + B^2 L^2}$ ===> **a + bL , L** étant la grandeur mesurée

4) Calcul de l'incertitude globale

Le résultat final d'un mesurage s'exprime, d'une part, par l'estimateur **μ** de la valeur vraie et, d'autre part, par l'estimation de l'incertitude globale. Dans la pratique, il est habitue d 'indiquer l'incertitude sous forme d'un intervalle à l'intérieur duquel se situe, avec une forte probabilité, la valeur vraie de la grandeur mesurée.
Si l'on connaît la loi de distribution de la population, on peut, à partir d'une variance connue, déterminer un intervalle de confiance correspondant à un niveau de confiance donné.
S'il s'agit, par exemple, d'une loi de distribution normale, les limites de confiances correspondant respectivement aux niveaux de confiance de 95 % et de 99 % sont voisines de 2s et de 3s. Il paraît assez évident que, sauf cas particulier, on ne connaît pas la loi de distribution de μ et que l'hypothèse d'une distribution normale, par exemple, est assez arbitraire. On peut alors déterminer conventionnellement et indépendamment de la forme de la loi de distribution, un "intervalle d'incertitude", analogue à un intervalle de confiance, mais pris dans un sens élargi. On calcule ainsi une incertitude globale Δμ, qui est obtenue en multipliant l'écart type déterminé pour μ par un facteur conventionnel k, égal à 2 ou 3, par exemple.
Dans le cadre des chaînes d'étalonnage, nous choisissons les limites de confiance $\pm$ 3s correspondant à un niveau de confiance de 99,7 %.
L'incertitude globale s'exprimera donc sous la forme :

$\Delta\mu = \pm k\, s$

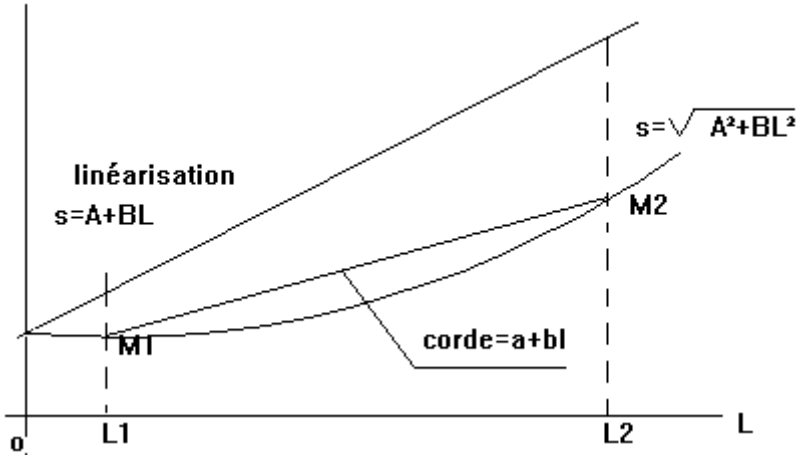
avec k >= 3

Ce coefficient k qui semble très subjectif était considéré comme coefficient de sécurité par les commissions permanentes d'agrément et estimé en fonction de paramètres inhérents au laboratoire.
A compter du 01-01-92 les chaînes d'étalonnage françaises afin d'être harmonisées avec les autres pays européens utilisent un coefficient k=2

5) Linéarisation :

afin d'avoir une estimation plus juste de la formule $\sqrt{A^2 + B^2 L^2}$ on pratique à une linéarisation comme le montre le schéma ci dessous:
s= $\sqrt{a^2 + b^2 L^2}$ se traduit par

s= a + bL qui majore la valeur de s



graphique n°D 1 linéarisation

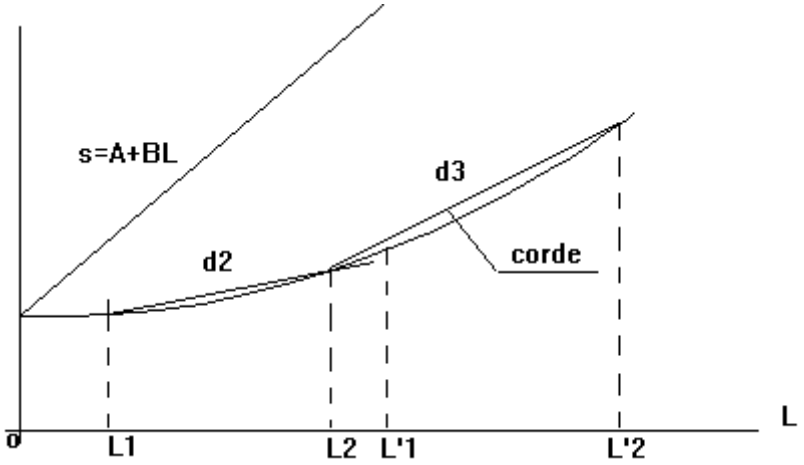
Le domaine **L1≤ L ≤ L2** ne pouvant être nul, il est préférable de linéariser l'expression $s=\sqrt{A^2+B^2L^2}$ en calculant l'équation de la corde passant par les deux points M1 et M2, ces deux points étant définis par les bornes L1 et L2 du domaine de mesure.
Cette corde, beaucoup plus proche de la courbe réelle, a comme équation
s = a+ bL

avec:

$$b=\frac{\sqrt{a^2+b^2L^2_{(2)}}-\sqrt{A^2+B^2L^2_{(1)}}}{L_{(2)}-L_{(1)}}$$

et $a=\sqrt{a^2+b^2L^2_{(1)}-bL_{(1)}}$

ce calcul permet ainsi de faire intervenir les bornes effectives du domaine de mesure, ce qui n'est pas le cas avec l'approximation de s= a + bL



graphique n°D 2 différence entre linéarisation globale et linéarisation par partie

La pente de la droite d1 reste constante quel que soit le domaine de mesure, tandis que les pentes des deux droites d1 et d2 sont directement liées au domaine de mesure considéré.

6)Calcul de l'incertitude globale de mesure Ig

L'incertitude globale Δm s'obtient en multipliant l'écart type **s** déterminé précédemment (méthode de la corde) par un facteur k que l'on fixe à 2.

Ig =± k s corde avec k s =2

En effet nous avons admis, par convention, que l'écart type relatif à une composante de type B s'obtenait en divisant l'appréciation de la valeur maximale par 3 ; ce sont les **"uj "**

Remarque:

Quand la loi de distribution de la population n'est pas normale, lorsque k=2, cela ne signifie pas que l'on a un niveau de confiance de 95%.

Comment effectuer les calculs ?

1) effectuer un bilan des erreurs possibles :
- appareil de mesure
- conditions de mesure
- opérateur
- élément mesuré
- mauvaise communication(doivent être corrigées avant)

2) chiffrer ces erreurs :
- erreurs de type A(choix du nombre de mesures statistiquement représentatif)
- erreurs de type B(déterminer une erreur maximum) par :
    - *expérience
    - *étalonnage
    - *calculs
    - *classe de l'instrument
    - *forme de la distribution (normale, rectangle, dérivée d'arc sinus)

3) calculer :
- la variance ou l'incertitude type de la mesure **Is**
- rétablir l'erreur globale en multipliant **Is** par le facteur **k**

Nota:

si la loi est normale $V(x) = \frac{a^2}{9}$ **et** $s = \frac{a}{3}$

si la loi est rectangle $V(x) = \frac{a^2}{3}$ **et** $s = \frac{a}{\sqrt{3}}$

si la loi est dérivée sinus $V(x) = \frac{a^2}{2}$ **et** $s = \frac{a}{\sqrt{2}}$

ANNEXE E

5-1- LA CAPABILITE DES MOYENS DE MESURE

5.1-1- Introduction

Le terme "**capabilité**" des moyens de mesure, traduction directe de "capability" en anglais, est un indice permettant de chiffrer le degré d'adéquation existant entre les performances d'un appareil de mesure et la valeur de la tolérance à vérifier.
Il s'apparente à la "**capabilité**" des moyens de production qui, lui aussi, permet de chiffrer la relation entre les moyens de production utilisés et les tolérances demandées.

Dans le cas **de productions en série**, le moyen utilisé doit être choisi non pas arbitrairement mais en fonction du but à atteindre : côtes, états de surface, défaut de forme, coût etc.
Cela passe, par un choix judicieux de la machine à utiliser de manière à prendre en compte tous les paramètres pouvant modifier la fabrication.
Le choix d'un moyen trop performant déboucherait sur un coût prohibitif, donc sur
de la" Par contre, une machine pas assez performante amènerait un pourcentage
de pièces défectueuses inacceptable.

Il existe donc bien une relation directe entre **moyen utilisé et but à atteindre.**

Dans les opérations de contrôle le choix de l'appareil de mesure est fonction de la tolérance à vérifier.
Par exemple, la vérification d'un diamètre 40H7 (intervalle de tolérance de 25 micromètres) ne pourrait se faire à l'aide d'un pied à coulisse avec une **résolution** au 1/20 de mm.
Nota: **Résolution** =Erreur de quantification

Avant chaque opération de contrôle, bien cerner les incertitudes de mesure que nous aurons à l'utilisation de tel ou tel appareil de contrôle ou de métrologie avant de pouvoir l'utiliser dans le but de valider une production.
Les **métrologues**, à l'origine, utilisaient la règle du 1/10.
Le choix de l'appareil se faisait de telle sorte que le rapport entre la tolérance à contrôler et la résolution de l'appareil utilisé devait être dans un rapport de 10.
On voit bien que cette méthode ne pourrait plus être appliquée pour des tolérances de l'ordre de quelques micromètres.
La norme française NFE 02-204 de mars 1987 a eu l'avantage, d'une part, de tenir compte de la qualité de la tolérance, et, d'autre part, de parler d'incertitude de mesure et non pas uniquement de résolution. La norme de décembre 1993 a confirmé dans ce sens et, ce qui est plus intéressant, d'intégrer la notion de risque client fournisseur.
Il apparaissait donc important de quantifier ce rapport entre tolérance et moyens.

Quelques définitions :

Indice de capabilité des moyens de production :

L'indice de capabilité du processus ou performance d'un processus de production est le rapport existant entre les variations possibles sur la production et l'intervalle de tolérance dans lequel doivent se trouver tous les éléments fabriqués.

Rappel de statistique
Une production en série obtenue sur un moyen automatisé ou semi-automatisé est caractérisée par la **FIDELITE** de ce moyen dans le temps et la position centrale des résultats donnée par le réglage donnée par la **MOYENNE**.

La dispersion globale du procédé est fonction de plusieurs paramètres variables pendant la production.
Ces différents paramètres connus ou estimés concourent à la précision de la fabrication et à sa stabilité.
Une analyse statistique nous permet, d'une manière générale, de déterminer les deux paramètres principaux qui sont :

La moyenne arithmétique estimée (PARAMETRE DE POSITION)
L'Ecart type (ou variance) estimés (PARAMETRE DE DISPERSION)

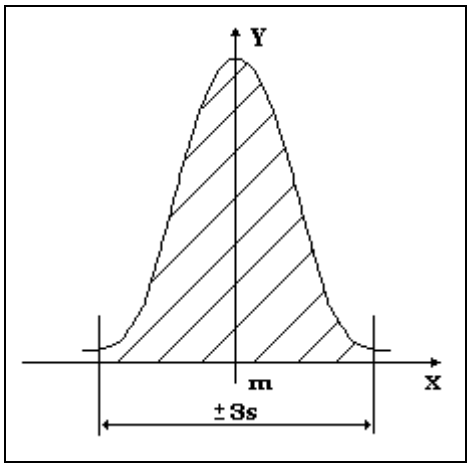


fig n°E 1 loi normale réduite

Prenons un exemple :
Un système automatisé de remplissage de sacs donne sur une présérie un estimateur de la moyenne à 49.98 kg et un estimateur de l'écart type de 0.11 kg.
L'intervalle de confiance du processus pour ± 3s(x) est
49,65 < 49,98 < 50,31 avec un niveau de confiance proche de 100%.
Les valeurs obtenues sont directement liées au moyen de production.

Si la tolérance imposée est de 50= ± 0,5 %, les limites de validité des sacs seront donc minimum=49,75 et maximum = 50,25
Calculons la proportion de la production qui sera hors tolérances.

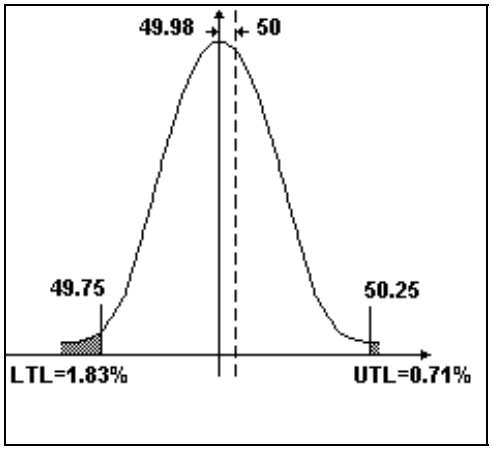


fig n°E 2 Proportion d'individus HT

$$LTL = \frac{49,75 - 49,98}{0,11} = -2,09$$ soit 1,83 % (inférieur à tolérance inférieure)

$$UTL = \frac{50,25 - 49,98}{0,11} = 2,45$$ soit 0,71 % (supérieur à tolérance supérieure)

La table de loi normale réduite donne 1,83 % en dessous de la tolérance inférieure et 0,71 % au-dessus de la tolérance supérieure.
Un contrôle systématique nous donnerait environ 3 sacs sur 100 hors tolérance.

Indice de capabilité : PC Index (CP)

C'est le rapport calculé, avec un seuil de confiance donné, entre la dispersion probable et l'intervalle de tolérance

Indice de centrage : CPK Index (cmk)

C'est le rapport existant entre la dispersion probable et l'intervalle de tolérance tenant compte du défaut de centrage de la production
Dans ce cas la variation entre le PC Index et le CPK Index est faible car la valeur centrale est très proche de 50 (valeur théorique).
Mais il est possible de recentrer la production en cas de variation inacceptable du réglage de la machine sans modifier la valeur du PC Index.

$$PCIndex = \frac{Tolérance\sup - Tolérance\inf}{6s(x)} = 0,75$$

$$CPKIndex = MIN(\frac{moy - Tol\inf}{3s(x)}) ou (\frac{Tol\sup - moy}{3s(x)}) = 0,69$$

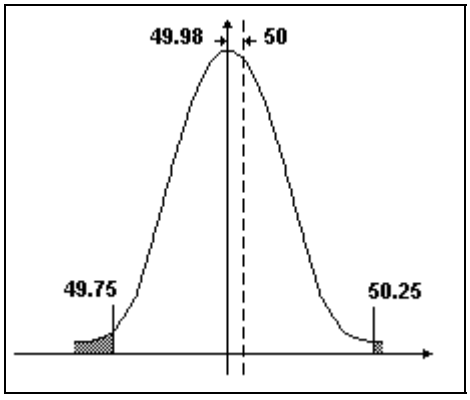


fig n°E 3 Tolérance supérieure et inférieure

L'indice de capabilité recommandé en production doit être compris :

1.33 < PC index < 1.67

Exemple:
Soit un diamètre à fabriquer avec un IT= 40 ± 0.02.
L'estimateur de l'écart type est de 0.0088.

Conclusions :

$$PCindex = \frac{0.04}{6 * 0.0088} = 0.75$$

Le procédé de fabrication n'est pas satisfaisant car l'indice de capabilité nous montre une valeur beaucoup trop faible. (0.75 au lieu de 1.33 minimum)

Que faire ?

Deux possibilités :

A)Changer le processus de fabrication
. Dans ce cas le processus, pour un PC index de 1.33, doit avoir un écart type inférieur à :

$$PCindex = \frac{IT}{6s(x)} = 1{,}33 \text{ donc } s(x) = 0{,}005$$

B) Revoir l'Intervalle de tolérance si cela est possible et en se fixant un PC index acceptable, (aux environs de 1.5) on aura dans ce cas :

Un $IT = 50 \pm 0.04$ (qui donne un $PCindex = 1{,}51$).

Mais peut-on doubler les tolérances ? .

La solution est certainement de choisir un processus de fabrication adapté.

En résumé, nous venons de voir que la notion de capabilité est une notion très importante dans un processus de gestion de la qualité des produits

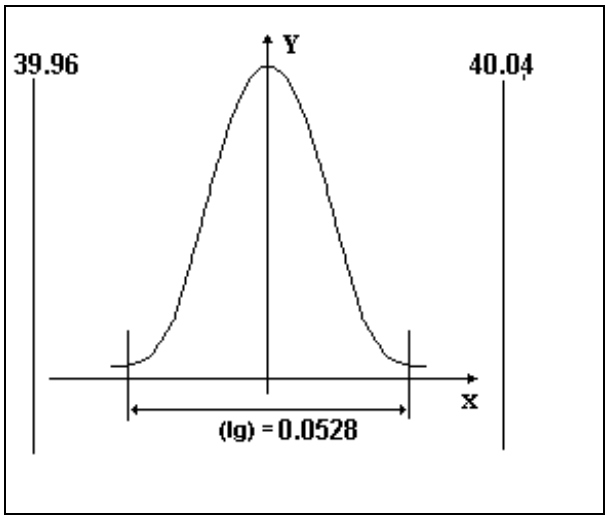


fig n°E 4 Tolérances modifiées

Annexe : Voir la table de la loi normale réduite (figure n° C9)

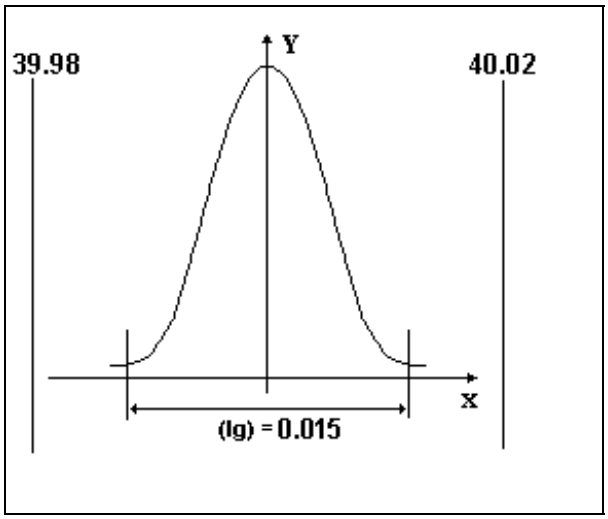


fig n°E 5 Processus modifié

5-1-2. Indice de capabilité des moyens de mesure (C.M.M.)

La capabilité des moyens de mesure est une notion similaire à la capabilité processus.
Elle permet le choix d'un appareil de mesure en fonction des tolérances à contrôler.
Elle est caractérisée par un indice de capabilité appelé **Capabilité des moyens de mesure**
Il se calcule de la même manière que le PC index vu en production.

$$CMM = \frac{IT}{Ig}$$

Nota : Ig = Incertitude globale de la mesure (avec un facteur conventionnel k= 3) (annexe D).

Exemple n°1 :

Soit à mesurer des pièces mécaniques de diamètres 40 ± 0.02 avec un pied à coulisse à lecture numérique dont la résolution (erreur de quantification) est de 0,01 mm.
On admettra pour les besoins de l'étude que cet appareil n'a pas d'autres erreurs et donc que l'incertitude de mesure (6 Ig) est égal à 0,02 mm.
Nota : En réalité ce n'est jamais vrai car il existe une grande quantité d'erreurs autres que celles données dans l'exemple (**Voir Incertitudes de mesure.)**

$$CMM = \frac{IT}{6Ig} = \frac{0,04}{0,02} = 2$$

Nota: On supposera que la distribution est gaussienne, (en réalité la résolution est uniforme rectangle).
On se contentera pour l'instant du calcul général.

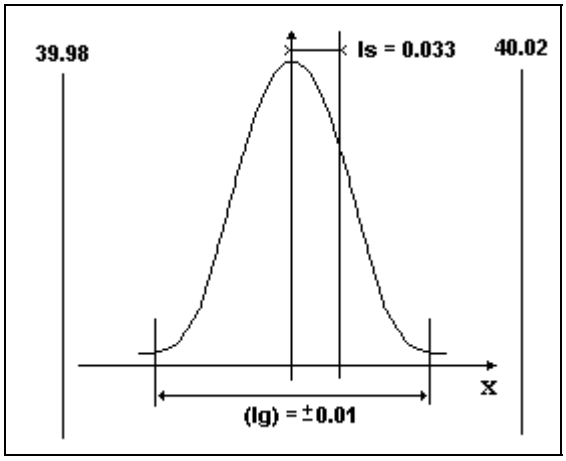


fig n°E 6 calcul du CMM

Dans l'exemple, l'incertitude étant globale, on peut estimer que l'incertitude type est de la forme :

$$Is = \frac{Ig}{6} = 0,033 \text{ (pour k = ± 3 on a P = 99,73 \%)}$$

Nota : k = facteur conventionnel

C'est à dire que pour une valeur lue de 40 mm l'incertitude globale est comprise entre 39,99 et 40,01 mm avec une probabilité proche de 100 %.(figure n°E-6)

1) Pour les valeurs lues de 39,99 et 40,01 mm, le risque pour le client de n'accepter une pièce HT est de 0,27 %, soit quasiment nul. (figure n°E-7)

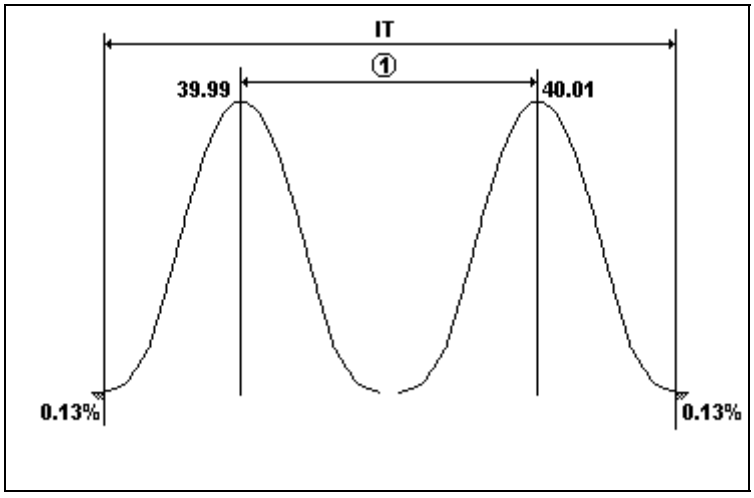


fig n°E 7 valeur lue à 40 mm

Limite d'acceptation (Probabilité 99,73 %)

2) Pour les valeurs lues de 39,98 d'une part, et 40,02 d'autre part, le risque pour le client est de 50 %, soit une chance sur deux d'accepter un produit non conforme. (figure n°E-8)

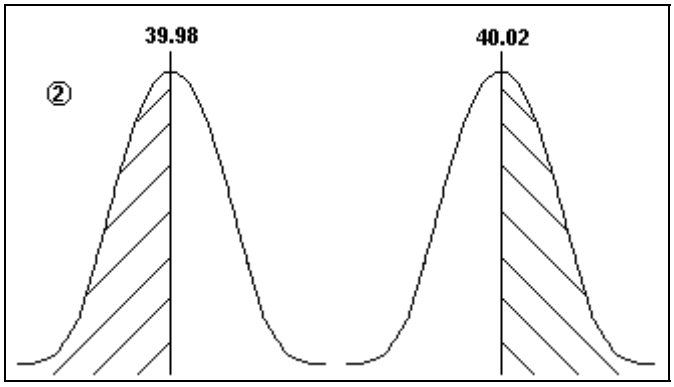


fig n°E 8 valeurs lues à 39.98 et 40.02mm

3) Pour les valeurs lues à 39,97 d'une part, et 40,03 d'autre part, le risque pour le client est nul, puisque HT a priori mais le risque est de 0,27 % pour le fournisseur de se voir refuser un produit conforme (statistiquement peu probable)(figure n°E-9)

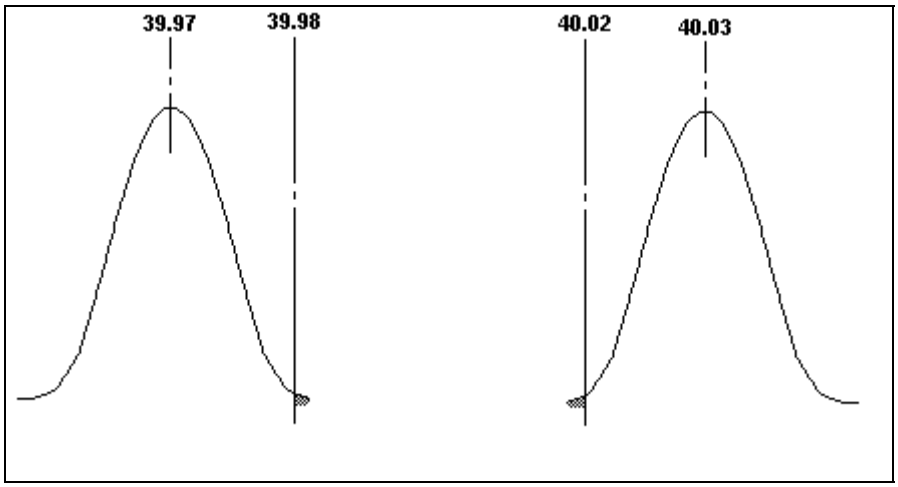


fig n°E 9 valeurs lues à 39.97 et 40.03mm

Nota : L'augmentation du nombre de mesures sur la même pièce dans le cas de litiges, permet de diminuer la valeur de Is dans une proportion de $\sqrt{n}$ (voir intervalle de confiance de la moyenne NFX 06-050).

Mais peut-on se permettre de mesurer chaque pièce plusieurs fois ?
Il est toutefois conseillé de le faire pour les valeurs limites.

La plupart des grands donneurs d'ordre impose au minimum une **CMM = 4**
Donc :

$$\frac{IT}{Ig} = 4$$

Si on estime l'incertitude globale Ig en fonction de Is (incertitude type), on devra donc avoir :

$$\frac{IT}{Is} = 6x4 = 24 \quad \text{avec k=3}$$

et **CMM** =24 Is ou Is = 0,042 IT

Nota : La norme NFE 02.204 de mars 1987 imposait $Is = \frac{1}{8} ITou \pm \frac{IT}{4}$

En prenant un risque à 5 % (k=2)

$\frac{IT}{Is}$ devient

$$\frac{24 * 2}{3} = 18$$

La négociation se fera donc sur les risques que prennent le client et le fournisseur pour l'acceptation du produit.

Afin de minimiser les risques au maximum, il conviendrait de diminuer la tolérance d'une valeur de kIs à l'intérieur des limites Minimum et Maximum comme le précise le graphique ci dessous (figure n°E-10)

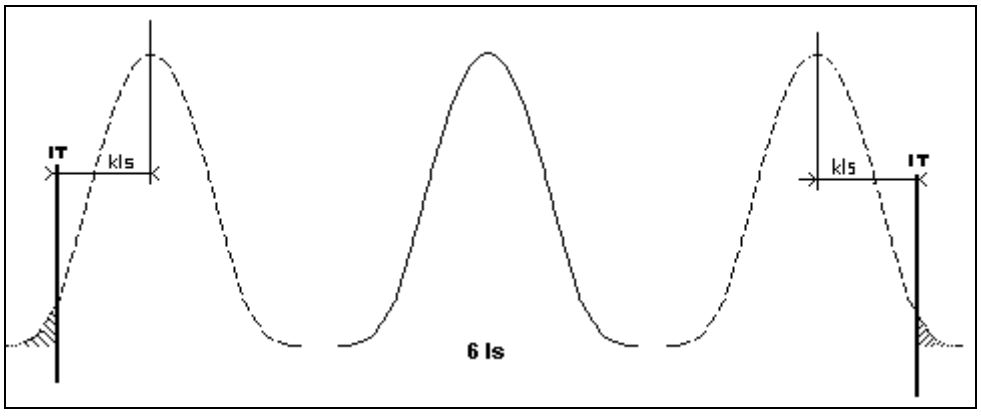


fig n°E 10 Modification des tolérances

IT devient : (TS - TI) - 4 Is ou 0,83 IT pour un risque client de 5 % **(±0.0165mm)**
(TS - TI) - 6 Is ou 0,75 IT pour un risque client de 0.27% **(±0.015mm)**
(TS - TI) - 8 Is soit 0,66 IT pour un risque client nul . **(±0.013mm)**

Exemple n°2 :

On utilise un micromètre à lecture numérique (étendue de mesurage 50-75 mm) avec une résolution de 0,001mm pour la vérification de tampons lisses de diamètres 60 H7 en utilisation "fabrication".
La tolérance de fabrication de ces calibres à dimension fixe est donnée pour le côté "entre" :

Limite supérieure : 60,004 mm
Limite inférieure : 60,001 mm norme NFE 02-202 **[37]**
Limite usure : 59,998 mm

On admettra donc que pour cette vérification la tolérance générale est de 0,006 mm avec un maximum à 60.004 mm et un minimum à 59.998
Les différents paramètres pris en compte pour le chiffrage de l'incertitude de mesurage sont

Incertitude de type A : 30 mesures sur une cale étalon de 60 mm (Fidélité)
Ef = 0.0003 (écart type estimé sur 20 mesures répétitives)

Incertitude de type B :
Ej =+0,005 mm (5 mesures effectuées sur une cale étalon de 50mm) (corrigée dans la mesure, correction de justesse -0,005 mm)
Ep = 0,0002 mm (planéité des touches) (estimée à l'aide d'une glace interférentielle)

Eta = 0,0007 mm (variation de température du local estimée à ± 1°) pour l'appareil de mesure
Ett = 0,0007 mm (variation de température du tampon ± 1°)
Er = 0,001 mm (Erreur de quantification) (Résolution)

Calcul de l'incertitude type Is (en micromètres)

$$Is = \sqrt{(0.3)^2 + (0,2/3)^2 + (0,7/3)^2 + (0,7/3)^2 + (1/\sqrt{3})^2}$$

$Is = 0,00093mm$ ou sensiblement 1µm

En effectuant le même calcul que dans l'exemple N°1 on aurait (en prenant k=3)

Ig = 6 Is Ig=6µm

$$CMM = \frac{IT}{Ig} = \frac{6\mu m}{6\mu m} = 1$$

Conclusions:

En se basant sur les démonstrations précédentes (voir exemple 1) seuls les tampons mesurés à 60.001mm peuvent être acceptés avec un risque de 0.27% et seulement ceux de valeur 60.000mm et 60.002 avec un risque de 5%.
De plus, dans ce cas il est impossible d'effectuer des modifications de tolérance.

On constate que dans ce type de contrôle il est nécessaire d'utiliser des moyens beaucoup plus performants (banc de mesures, nappe laser, etc.) sous peine de rejeter des calibres dans les tolérances ou d'accepter des calibres non conformes.
En conclusion, malgré l'utilisation de moyens de mesures coûteux et à priori performants, on ne peut garantir complètement des résultats de mesures.
Seule une analyse rigoureuse de ces moyens nous permettront de se faire une bonne idée sur la performance de nos appareils de contrôle.

Conclusions générales :
La notion de capabilité de moyens de mesure doit être présente à chaque fois que l'on est amené à utiliser un appareil de mesure.
Il faut impérativement faire le **choix** d'un appareil de mesure d'une manière réfléchie
Il faut choisir **l'appareil capable** en tenant compte de son incertitude estimée le plus précisément possible et en la comparant à la tolérance que l'on veut vérifier.

ANNEXE F

1EXTRAITS DE LA NORME NFE 02-204 [14]

6-1-1-Introduction

La norme 02-204 de mars 1987 a été modifiée en décembre 1993 afin de la rendre plus applicable dans l'industrie.
Elle parle principalement de relations entre client et fournisseur.
Une négociation doit être le préalable à toute vérification de produit.
Cette négociation ne portera pas uniquement sur le rapport incertitude – tolérance ; mais également sur l'estimation des risques.
A partir de l'incertitude de mesure, une analyse statistique permet d'estimer les risques de déclarer un produit conforme mauvais ou non conforme un produit bon.

1) Domaine d'application

La présente norme a pour objet de définir un ensemble de règles permettant, à partir d'un résultat de mesure, de déclarer qu'un produit est conforme ou pas à la spécification concernée.
Nota: le terme produit inclut les instruments de mesurage dimensionnel.
Ces règles sont établies à partir :

- des tolérances dimensionnelles (tolérances linéaires ou angulaires) ou géométriques spécifiées et, dans le cas d'un instrument de mesurage, des erreurs maximales tolérées ;
- des incertitudes de mesure.

La présente norme s'applique à la vérification dimensionnelle de produits effectués à l'aide d'appareils mesureurs. Elle ne s'applique pas au contrôle par calibre à limites, objet de la norme NFE 02.201.

2) Références

NFE 04-560 Dessins techniques - Cotations et tolérancement. Vocabulaire

NFE 10-100 Méthodes de mesurage dimensionnel - Première partie : Généralités.

NFX 06-044.1984 Application de la statistique - Traitement des résultats de mesure - Détermination de l'incertitude associée au résultat final.
NFX 06-050 Application de la statistique. Etude de la normalité d'une distribution.

NFX 07-001-1984 Normes fondamentales - Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie.
NFX 50-120 Qualité - Vocabulaire

3- Symboles et définitions

3-*1Symboles utilisés :*

tableau n°F 1 Symboles

Symboles	**Signification**
t	Tolérance spécifiée
k	facteur conventionnel
g	résultat final d'une mesure
μ	estimateur de la valeur vraie
v (μ)	variance de l 'estimation de la valeur vraie
$\Delta \mu$	incertitude globale
is	incertitude type

6-1-2-Définitions

3-2-1 *Tolérance* :
Spécification qui définit la variation admissible de dimension (tolérance dimensionnelle) ou de géométrie (tolérance géométrique) (NFE 049560)

3-2-2 *Erreur maximale tolérée d'un instrument de mesure :*
Valeurs extrêmes d'une erreur tolérée par les spécifications, règlements, etc., relatives à un instrument de mesure donné (NFX 07-001).

En général si l'erreur tolérée est exprimée par +/-e on aura t= 2e

3-2-3 Résultat d'un mesurage :

Valeur d'une grandeur mesurée obtenue par mesurage (NFX 07-001).
Dans ce cas ce terme s'applique à une dimension, à une caractéristique géométrique ou à l'indication de l'instrument de mesure.

3-2-4 Incertitude de mesure :

Estimation caractérisant l'étendue des valeurs dans laquelle se situe la valeur vraie d'une grandeur.
L'incertitude comprend en général plusieurs composantes. Certaines sont fondées sur une distribution statistique de résultats de séries de mesurage. Elles sont dans ce cas caractérisées par un écart type expérimental. L'estimation des autres composantes sera fondée sur l'expérience ou sur d'autres informations.

3-2-5 incertitude type (is) :

C'est la valeur de l'écart type estimé caractérisant l'incertitude de mesure.

3-2-6 non-conformité :

C'est la non-satisfaction aux exigences spécifiées. (NFX 50-120)

6-1-3- Règles

Tout résultat de mesurage étant entaché d'erreur, il convient, pour vérifier que la valeur conventionnellement vraie est dans la tolérance spécifiée, de respecter un certain nombre de règles ; ceci d'une part diminue les sources de litiges entre client et fournisseur et, d'autre part, d'estimer les risques soit de déclarer conforme un produit mauvais, soit de déclarer non conforme un produit bon.
Les règles son de deux natures :
- Limiter l'incertitude de mesure par rapport à la tolérance spécifiée ;
- Fixer les conditions auxquelles doit satisfaire un produit pour être déclaré conforme aux spécifications.

Détermination de l'incertitude de mesure

Les incertitudes de mesure doivent obligatoirement avoir été déterminées en appliquant la norme X 06-044.
Cette norme permet d'estimer l'incertitude de mesure appelée incertitude globale ($\Delta\mu$).
Cette incertitude globale sera calculée en multipliant l'incertitude type (is) par le facteur conventionnel (k). Afin d'éviter tout litige, ce facteur (k) sera précisé dans l'expression finale du résultat.

Rapport entre l'incertitude type (is) et la tolérance spécifiée (t)

Le rapport maximal entre l'incertitude type et la tolérance doit être spécifiée par un accord client fournisseur.

En général ce rapport est de 1/16, ce qui correspond à un rapport de 4 entre la tolérance et l'incertitude globale.

Critère de décision de conformité

Sauf spécification particulière, compte non tenu de l'incertitude de mesure, la règle suivante sera employée :

- si le résultat de mesure est à l'intérieur de la zone **1** (bornes non exclues), le produit est déclaré conforme.
- si le résultat de mesure est à l'intérieur de la zone **2** (bornes exclues), le produit est déclaré non conforme.
- si le résultat de mesure est à l'intérieur de la zone **3**, le produit peut être déclaré conforme ou non conforme avec risques selon l'accord client fournisseur.

Quand cela est possible, il y a lieu de réduire l'incertitude de mesure. Si malgré cela le résultat est toujours dans la zone **3,** le produit sera déclaré conforme ou non conforme en fonction des risques acceptés dans l'accord client fournisseur.

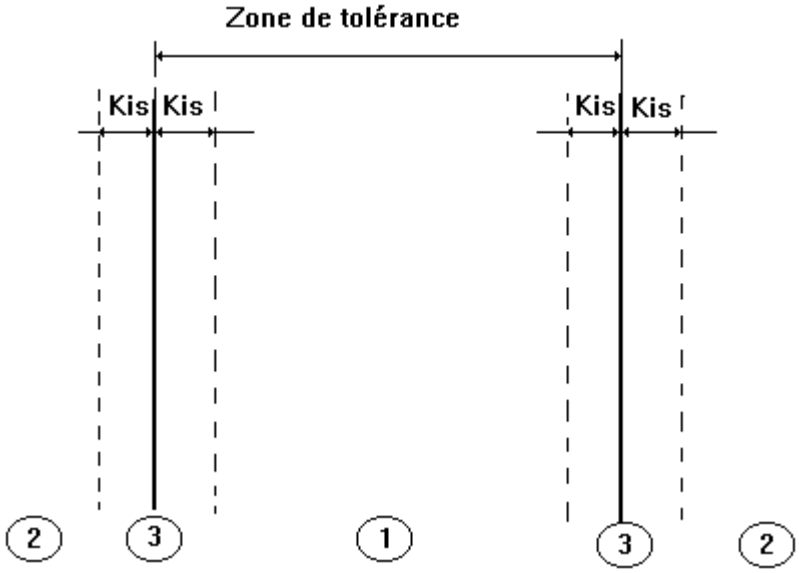


fig n°F 1 zone d'acceptation et de refus en fonction de la tolérance

Litiges

Si en dépit de l'application des règles ci-dessus énoncées, un litige apparaît, il y a lieu :

- de retenir la valeur mesurée obtenue avec l'incertitude la plus faible convenablement estimée.
- et, si le litige persiste, de recourir à l'arbitrage d'un laboratoire accepté par les deux parties.

Application: annexe (a) de la norme
On doit vérifier un arbre de diamètre 15 ± 0.2mm.

Le choix se porte sur un appareil de mesure dont la valeur Is est de 0.02mm.
Pour une valeur de 14.84 mm son expression finale est = 14.84 ± 0.06 avec k =3

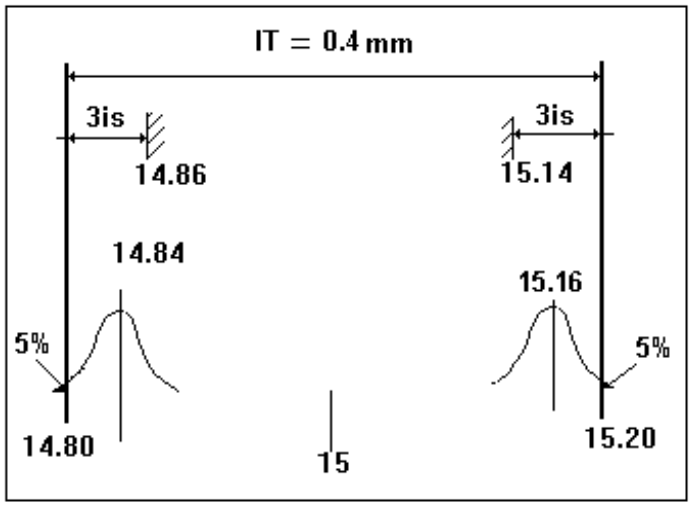


fig n°F 2 : exemple de zone d'acceptation et de refus en fonction de la tolérance

Calcul de la probabilité d'avoir une valeur inférieure à 14.80 mm.

$$U = \frac{14.84 - 14.80}{0.02} = 2$$

En se reportant à la table de loi normale réduite (voir éléments de statistique), la valeur de U=2 correspond à une probabilité de 0.9772 soit une probabilité de 0.0228 d'être réellement en dessous de 14.80.
Réduction des risques :
Afin de diminuer les risques de déclarer conforme un produit non conforme, on réduira la zone de tolérance de
k Is suivant le risque choisi.
Ex : 3 Is pour un risque à 0.135% et 1.93 Is pour un risque à 5%

Nota: Actuellement est en projet une norme NF EN ISO 14253-1 : (Indice de classement NFE 02-204-1) qui reprend une norme européenne EN ISO 14253-1:199.
L'esprit de cette norme restera celui de la NFE 02-204.

ANNEXE G :
Certificat d'étalonnage de la bague étalon de 90 mm. Page de garde.



INSTITUT
MEDITERRANEEN
de la QUALITE

Quartier Lagoubran - Chemin Gastaldo - 83200 TOULON - Tél. 04 94 09 78 00

CHAÎNE NATIONALE D'ETALONNAGE BNM-COFRAC
METROLOGIE DIMENSIONNELLE
HABILITATION N° 2.1101

N/REF : A 191/98

CERTIFICAT D'ETALONNAGE

N° 191/98/A

DELIVRE A : IUT TOULON GENIE MECANIQUE ET PRODUCTIQUE Monsieur CLOITRE
BP 132
83957 LA GARDE CEDEX

INSTRUMENT ETALONNE

Désignation : 01 Bague lisse étalon

Constructeur : TESA

Type : A

N° de série : 6Y288
N° d'identification : /

Ce certificat comprend 05 pages Date d'émission : 16/07/1998
01 annexe comportant 02 pages.

LE SECRETAIRE GENERAL

P. VALVERDE

LE RESPONSABLE DU SMH

C. GUILLOU

cofrac
ETALONNAGE

LA REPRODUCTION DE CE CERTIFICAT N'EST AUTORISEE QUE
SOUS LA FORME DE FAC-SIMILE PHOTOGRAPHIQUE INTEGRAL

Certificat d'étalonnage bague étalon de diamètre 90mm
Résultats de mesure :

. Certificat d'étalonnage N° 191/98/A

Date 03/07/98	BAGUES LISSES ETALONS	I.M.Q. TOULON

Numéro rèf.	Nature Identification	Valeurs mesurées	Etat visu.	Incert. (µm)
6Y288	Bague Lisse Etalon 90 +3µm	D = 90.0034 mm C = 0.6 µm	RAS	± 1.7 ± 0.5

Signature :

ANNEXE H
7-1-PROGRAMMES DE MESURE

7-1-1-Programme n°1 qualification sur une sphère en 19pts:

1 point au pôle, 9 au tropique et 9 à l'équateur
Accostage suivant la normale
Vitesse 20% soit 1.6m/mn
30 qualifications et stockage des résultats dans un fichier sph19.mea.

```
program CAL19[WM1,WM2]
  element_array MEMORY[200]
  real X,Y,Z,F0,DM,F1,F,R,DP
  real RA=25,RB=20,RP=2,RC=30
  real RD=12.6,RE=10.6
  integer A=45
  real RAYON
  coord CCRA,CCRM,CCRM2,CCRB,CCRC,CCRD,CCRE,CCRF,CCRG
  vector VMES,VMESB,VMESC
  real DS=29.369
  vector COORD1
  element DIA1
  element FORME
  metric_mode
  deg_angle
  set_dim (dm=whole,a=full,arel=acute,amode=a360)
  dy
  prn
  ref0
  probe0
  refsys 0
  gauge 1
  ph9 (A=.0,B=.0)
  tool_offset (X=.0,Y=.0,Z=-180)
  calib_diam 15.875
  calib (1,1)
  msph (MEMORY[100],5)
  preset (MEMORY[100],1)
  ncmove
  mspeed 20
  move (X=0,Y=0,Z=25)
  openf (f0,"c:\wtutor\meas\sph19.mea")
  rewrite (f0)
  for Q=1 to 30 by 1
```

```
    quali (Q,1)
    msph (MEMORY[Q],19)
    CCRA={0,0,RA}
    CCRB={0,0,RB}
    VMES={0,0,-1}
    move (CCRA)
    movetf (CCRB,VMES)
    move (CCRA)
    move (X=15,Y=0,Z=15)
    for I=0 to 320 by 40
      CCRF={RD*cos (I),RD*sin (I),11.8}
      CCRG={RE*cos (I),RE*sin (I),10.38}
      CCRE={RC*cos (I),RC*sin (I),30}
      VMESC={-RP*cos (I),-RP*sin (I),-RP*0.707}
      move (CCRF)
      movetf (CCRG,VMESC)
      move (CCRE)
      move (X=0,Y=0,Z=35)
      CCRC={RA*cos (I),RA*sin (I),0}
      CCRD={RB*cos (I),RB*sin (I),0}
      CCRE={RC*cos (I),RC*sin (I),30}
      VMESB={-RP*cos (I),-RP*sin (I),0}
      move (CCRC)
      movetf (CCRD,VMESB)
      move (CCRE)
    end_for
    COORD1=(MEMORY[Q])
    RAYON=info_func (4)
    FORME=(MEMORY[Q])
    X=COORD1|x
    Y=COORD1|y
    Z=COORD1|z
    DM=DIA1|dm
    F=FORME|f
    writeln (f0,X,"     ",Y,"    ",Z,"     ",RAYON,"    ",F,"     ")
  end_for
  closef (f0)
endstat
end_program
```

7-1-2-Programme n°2 qualification sur une sphère variation de A de 0° à 90 ° de 7.5° en 7.5°:

Qualification du palpeur sur une sphère de 15.875 mm en 5 points en faisant varier les angles d'accostage de 7.5 en 7.5°.
Vitesse d'accostage 20%.
Accostage normal.
Stockage des valeurs dans un fichier sphx.meas.
Prise en compte du recul de la machine.

```
program SPH602[WM1,WM2]
  element_array MEMORY[250]
  real X,Y,Z,FO,DM,F1,F,DP,X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2,Q2,X3,X4,Z4
  real XA,YA,ZA,XB,YB,ZB,T,A,Q1
  real RB=123.455,RA,RP=2,RC=18,RM=130,R=7.9375,R1A,R1B
  integer P
  real RAYON
  coord CCRA,CCRM,CCRM2,CCRB,CCRC,CCRD,CCRE,CCRF
  vector VMES,VMESB
  real DS=15.875
  vector COORD1
  element DIA1
  element FORME
  metric_mode
  deg_angle
  set_dim (dm=whole,a=full,arel=acute,amode=a360)
  dy
  noprn
  ref0
  probe0
  refsys 0
  gauge 1
  ph9 (A=.0,B=.0)
  tool_offset (X=.0,Y=.0,Z=-122.997)
  calib_diam 15.875
  calib (1,1)
  msph (MEMORY[100],5)
```

```
preset (MEMORY[100],1)
ncmove
mspeed 20
move (X=0,Y=0,Z=25)
openf (f0,"c:\wtutor\meas\sphx.meas")
rewrite (f0)
RA=RB+10
R1B=RB-R
R1A=R+15
deg_angle
for J=6 to 6 by 1
  Q2=0
  Q1=J*7.5
  ph9 (A=Q1,B=Q2)
  for S=1 to 30 by 1
    ph9 (A=0,B=0)
    ph9 (A=Q1,B=Q2)
    quali (S,1)
    msph (MEMORY[S],5)
    XA=(-RA*sin (Q1))-(R1A*sin (Q1))
    YA=0
    ZA=(-RB+(RB*cos (Q1)))+(R1A-(R1A*sin (Q1)))
    XB=(-RB*sin (Q1)-(R*sin (Q1)))
    YB=0
    ZB=(-RB+(RB*cos (Q1)))+(R-(R*sin (Q1)))
    VMES={RP*sin (Q1),0,-RP*cos (Q1)}
    CCRA={XA,YA,ZA}
    CCRB={XB,YB,ZB}
    move (CCRA)
    movetf (CCRB,VMES)
    move (CCRA)
    move (X=0,Y=0,Z=125)
    for I=-180 to 90 by 90
      X1=(-RA*sin (Q1))-(R1A-R1A*sin (Q1))*cos (I)
      Y1=R1A*sin (I)
      Z1=-(RA-RA*cos (Q1))-((R1A*sin (Q1)*cos (I)))
      X2=(-RB*sin (Q1))-(R-R*sin (Q1))*cos (I)
      Y2=R*sin (I)
      Z2=-(RB-RB*cos (Q1))-((R*sin (Q1)*cos (I)))
      CCRC={X1,Y1,Z1}
      CCRD={X2,Y2,Z2}
      VMESB={RP*cos (Q1)*cos (I),-RP*sin (I),-RP*sin (Q1)*cos (I)}
      X3=-(RM*sin (Q1))
      X4=(-RA*sin (Q1))+(R1A*cos (I))
      Z4=-(RA-RA*cos (Q1))
      Y=0
      Z=RM
      CCRE={X4,Y,Z}
      CCRF={X3,Y,Z}
      move (CCRE)
```

```
      move (CCRF)
      move (CCRC)
      movetf (CCRD,VMESB)
      move (CCRC)
      move (CCRF)
    end_for
    COORD1=(MEMORY[S])
    RAYON=info_func (4)
    FORME=(MEMORY[S])
    X=COORD1|x
    Y=COORD1|y
    Z=COORD1|z
    DM=DIA1|dm
    F=FORME|f
    writeln (f0,X,"       ",Y,"   ",Z,"      ",RAYON,"    ",F,"     ")
  end_for
 end_for
 closef (f0)
endstat
end_program
```

7-1-3-Programme n°3 mesure d'une droite en 100 points

Mesure d'une droite en 100 points avec accostage normal suivant une direction privilégiée en X.
Vitesse d'accostage 20%.
Accostage normal.
Stockage des valeurs dans un fichier sphx.meas.

```
program DROITE[WM1,WM2]
 element_array MEMORY[300]
 real X,Y,Z,F
 integer INT
 element FORME
 vector COORD1
 metric_mode
 deg_angle
 set_dim (dm=whole,a=full,arel=acute,amode=a360)
 dy
 noprn
```

```
  ref0
  ph9 (A=.0,B=.0)
  load (probe,"C:\WTUTOR\DATA\sph522.TIP")
  mline (MEMORY[1],3) path PT1
  mline (MEMORY[2],3) path PT2
  mpl (MEMORY[3],4) path PT3
  proj (MEMORY[10],MEMORY[1],MEMORY[3])
  proj (MEMORY[11],MEMORY[2],MEMORY[3])
  inter (MEMORY[12],MEMORY[10],MEMORY[11])
  skew1 (MEMORY[3],1,zdir)
  skew2 (MEMORY[10],1,z,xdir)
  preset (MEMORY[12],1)
  mspeed 20
  openf (f0,"c:\WTUTOR\meas\droitdef.mea")
  rewrite (f0)
  ncmove
  for I=1 to 30 by 1
    probe (1,1)
    MEMORY[1]=""
    mline (MEMORY[1],100) path PT4
    FORME=(MEMORY[1])
    COORD1=(MEMORY[1])
    X=COORD1|x
    Y=COORD1|y
    Z=COORD1|z
    F=FORME|f
    writeln (f0,F,"  ")
  end_for
endstat
end_program
#include C:\WTUTOR\PROG\DROIT100.PAT
```

7-1-4-Programme n°4 mesure d'un plan en 100 points

Mesure d'un plan en 100 points avec accostage normal suivant deux directions privilégiées en X et Y.
Vitesse d'accostage 20%.
Accostage normal.
Stockage des valeurs dans un fichier gp30100y.meas.

```
program GPLAN1[WM1,WM2]
  element_array MEMORY[150]
  element FORME
  element DEVSTD
```

```
  real F,SD
  metric_mode
  deg_angle
  set_dim (dm=whole,a=full,arel=acute,amode=a360)
  dy
  prn
  ref0
  refsys 0
  mspeed 10
  load (probe,"C:\WTUTOR\DATA\sph522.TIP")
  mpl (MEMORY[100],3) path PT1
  mpick (MEMORY[101],1) path PT2
  skew1 (MEMORY[100],2,zdir)
  preset (MEMORY[101],2)
  ncmove
  mspeed 20
  openf (f0,"c:\wtutor\meas\gp30100y.mea")
  rewrite (f0)
  for I=1 to 30 by 1
    mpl (MEMORY[I],100) path PT3
    FORME=(MEMORY[I])
    DEVSTD=(MEMORY[I])
    F=FORME|f
    SD=DEVSTD|sdev
    writeln (f0,F,"    ",SD,"   ")
  end_for
  closef (f0)
endstat
end_program

#include C:\WTUTOR\PROG\GPLAN100.PAT
```

7-1-5-Programme n°5 mesure d'une bague en 100 points

Mesure d'une bague en 100 points avec accostage normal Vitesse d'accostage 20%.
Rotation autour de Z
Accostage normal.
Correction du rayon dynamique suivant 2 eme procédure #n°4-4-4-1-2.
Stockage des valeurs dans un fichier bag.meas.

```
program BAGUE[WM1,WM2]
  element_array MEMORY[300]
  real X,Y,Z,DM,F
  integer INT
  element DIA1
  element FORME
  vector COORD1
  metric_mode
  deg_angle
  set_dim (dm=whole,a=full,arel=acute,amode=a360)
  dy
  noprn
  ref0
  ph9 (A=.0,B=.0)
  load (probe,"C:\WTUTOR\DATA\sph522.TIP")
  mpl (MEMORY[100],4) path PT1
  tdiam (1,1,3.9923)
  mcir (MEMORY[101],4) path PT2
  skew1 (MEMORY[100],1,zdir)
  preset (MEMORY[101],1)
  openf (f0,"c:\WTUTOR\meas\bag.mea")
  mspeed 20
  rewrite (f0)
  for I=1 to 30 by 1
    HO(100,1,{.0,.0,.0},{40.,.0,25.},"z") ext "C:\WTUTOR\PROCEDUR\proc_eng.tec"
    DIA1=(MEMORY[I])
    FORME=(MEMORY[I])
    COORD1=(MEMORY[I])
    X=COORD1|x
    Y=COORD1|y
    Z=COORD1|z
    DM=DIA1|dm
    F=FORME|f
    writeln (f0,X,"   ",Y,"   ",Z,"   ",DM,"   ",F,"   ")
  end_for
endstat
end_program

#include C:\WTUTOR\PROG\BAGUE.PAT
```

7-1-6-Programme n°6 mesure d'une sphère en 91 points

Mesure d'une bague en 100 points avec accostage normal Vitesse d'accostage 20%.

1 point au pôle, 45 au tropique, 45 à l'équateur.
Accostage normal.
Stockage des valeurs dans un fichier mesph9R.meas.

```
program MESPH1[WM1,WM2]
  element_array MEMORY[200]
  real X,Y,Z,F0,DM,F1,F,R,DP
  real RA=25,RB=20,RP=2,RC=30
  real RD=12.6,RE=10.6
  integer A=45
  real RAYON
  coord CCRA,CCRM,CCRM2,CCRB,CCRC,CCRD,CCRE,CCRF,CCRG
  vector VMES,VMESB,VMESC
  real DS=29.369
  vector COORD1
  element DIA1
  element FORME
  metric_mode
  deg_angle
  set_dim (dm=whole,a=full,arel=acute,amode=a360)
  dy
  prn
  ref0
  probe0
  refsys 0
  gauge 1
  ph9 (A=.0,B=.0)
  tool_offset (X=.0,Y=.0,Z=-180)
  load (probe,"C:\WTUTOR\DATA\SPH522.TIP")
  tdiam (1,1,3.9878)
  msph (MEMORY[100],5)
  preset (MEMORY[100],1)
  ncmove
  mspeed 20
  move (X=0,Y=0,Z=25)
  openf (f0,"c:\wtutor\meas\mesph9R.mea")
  rewrite (f0)
  for Q=1 to 30 by 1
    msph (MEMORY[Q],91)
    CCRA={0,0,RA}
    CCRB={0,0,RB}
    VMES={0,0,-1}
    move (CCRA)
    movetf (CCRB,VMES)
    move (CCRA)
    move (X=15,Y=0,Z=15)
    for I=0 to 270 by 90
      CCRF={RD*cos (I),RD*sin (I),11.8}
      CCRG={RE*cos (I),RE*sin (I),10.38}
      CCRE={RC*cos (I),RC*sin (I),30}
```

```
    VMESC={-RP*cos (I),-RP*sin (I),-RP*0.707}
    move (CCRF)
    movetf (CCRG,VMESC)
    move (CCRE)
    move (X=0,Y=0,Z=35)
    CCRC={RA*cos (I),RA*sin (I),0}
    CCRD={RB*cos (I),RB*sin (I),0}
    CCRE={RC*cos (I),RC*sin (I),30}
    VMESB={-RP*cos (I),-RP*sin (I),0}
    move (CCRC)
    movetf (CCRD,VMESB)
    move (CCRE)
  end_for
  COORD1=(MEMORY[Q])
  DIA1=(MEMORY[Q])
  RAYON=info_func (4)
  FORME=(MEMORY[Q])
  X=COORD1|x
  Y=COORD1|y
  Z=COORD1|z
  DM=DIA1|dm
  F=FORME|f
  writeln (f0,X,"     ",Y,"    ",Z,"     ",DM,"    ",F,"     ")
 end_for
 closef (f0)
endstat
end_program
```

7-1-7-Programme n°7 mesure d'une pièce test (intercomparaison)

Mesure partielle d'une pièce test suivant la procédure définie par le BNM pour les intercomparaisons.
Pièce n°1 résulatats de l'intercomparaison de novembre 1992.
Vitesse d'accostage 20%.
Moyenne de 3 mesures avec remise en position entre chaque série.

```
program INT31[WM1,WM2]
 element_array MEMORY[300]
 metric_mode
 deg_angle
 set_dim (dm=whole,a=full,arel=acute,amode=a360)
 dy
 prn
 ref0
 mspeed 20
```

```
ncmove
probe (1,1)
MEMORY[1]="mesure plan 1 provisoire"
mpl (MEMORY[1],3) path PT1
MEMORY[2]="mesure droite 2"
mline (MEMORY[2],2) path PT2
MEMORY[3]="mesure point sur x"
msh (MEMORY[3],1) path PT3
MEMORY[265]="projection 2/1"
proj (MEMORY[265],MEMORY[2],MEMORY[1])
MEMORY[266]="projection 3/1"
proj (MEMORY[266],MEMORY[3],MEMORY[1])
skew1 (MEMORY[1],10,zdir)
skew2 (MEMORY[265],10,z,ydir)
preset (MEMORY[266],10)
MEMORY[267]="mesure plan arriere 4(5)"
mpl (MEMORY[267],3) path PT4
MEMORY[4]="mesure plan superieur 4"
mpl (MEMORY[4],3) path PT5
MEMORY[7]="mesure plan gauche 7"
mpl (MEMORY[7],3) path PT6
MEMORY[6]="intersection 4/267 (6)"
inter (MEMORY[6],MEMORY[4],MEMORY[267])
MEMORY[8]="intersection 7/6(8)"
inter (MEMORY[8],MEMORY[7],MEMORY[6])
skew1 (MEMORY[4],10,zdir)
skew1 (MEMORY[4],2,zdir)
skew2 (MEMORY[6],2,z,ydir)
preset (MEMORY[8],2)
MEMORY[9]="mesure plan avant 9"
mpl (MEMORY[9],3) path PT7
MEMORY[10]="mesure plan oblique10"
mpl (MEMORY[10],3) path PT8
MEMORY[11]="mesure plan droit (11)"
mpl (MEMORY[11],3) path PT9
preset (WM1,X=20.,Y=190.,Z=.0,2)
skew1 (MEMORY[4],3,zdir)
skew2 (WM1,3,z,ydir)
skew2 (MEMORY[6],3,z,ydir)
preset (MEMORY[1],X=20.,Y=190.,Z=.0,3)
refsys 10
MEMORY[12]="mesure cylindre Diametre 28"
mcyl (MEMORY[12],8,sdm) path PT10
MEMORY[13]="mesure cylindre 13"
mcyl (MEMORY[13],8,sdm) path PT11
MEMORY[14]="mesure cylindre 15 en 8 PTS"
mcyl (MEMORY[14],8,sdm) path PT12
MEMORY[15]="mesure cylindre 15 en 36 points"
mcyl (MEMORY[15],36,sdm) path PT13
skew1 (MEMORY[4],10,zdir)
```

```
skew2 (MEMORY[6],10,z,ydir)
preset (MEMORY[8],10)
HO(36,16,{-50.,-46.,.0},{54.,-10.,25.},"z") ext "C:\WTUTOR\PROCEDUR\proc_eng.tec"
MEMORY[60]="projection cercle 16/4"
proj (MEMORY[60],MEMORY[16],MEMORY[4])
MEMORY[17]=""
mpl (MEMORY[17],58) path PT14
MEMORY[19]="intersection 4/9"
inter (MEMORY[19],MEMORY[4],MEMORY[9])
MEMORY[20]="intersection 10/19"
inter (MEMORY[20],MEMORY[10],MEMORY[19])
MEMORY[21]="intersection 10/11"
inter (MEMORY[21],MEMORY[10],MEMORY[11])
MEMORY[22]="intersection 10/4"
inter (MEMORY[22],MEMORY[10],MEMORY[4])
MEMORY[23]="intersection 21/4"
inter (MEMORY[23],MEMORY[21],MEMORY[4])
MEMORY[24]="intersection 9/11"
inter (MEMORY[24],MEMORY[9],MEMORY[11])
MEMORY[25]=""
inter (MEMORY[25],MEMORY[4],MEMORY[24])
MEMORY[26]="intersection 12/4"
inter (MEMORY[26],MEMORY[12],MEMORY[4])
MEMORY[27]="intersection 13/4 (E)"
inter (MEMORY[27],MEMORY[13],MEMORY[4])
MEMORY[28]="intersection 14/4(D)"
inter (MEMORY[28],MEMORY[14],MEMORY[4])
MEMORY[29]="construction droite 28/27 (29)"
iline (MEMORY[29],2,MEMORY[27])
MEMORY[30]="iconstruction droite 30 (27/26)"
iline (MEMORY[30],2,MEMORY[26])
MEMORY[31]="construction ligne26/28(31)"
iline (MEMORY[31],MEMORY[26],MEMORY[28])
MEMORY[101]="angle 30/29"
inter (MEMORY[101],MEMORY[30],MEMORY[29])
MEMORY[102]="angle 31/30"
inter (MEMORY[102],MEMORY[31],MEMORY[30])
MEMORY[103]="angle 29/31"
inter (MEMORY[103],MEMORY[29],MEMORY[31])
MEMORY[32]="construction plan z=135"
define_element (MEMORY[32],plane,x=.0,y=.0,z=135.,cx=.0,cy=.0,cz=1)
MEMORY[33]="angle 31/30"
inter (MEMORY[33],MEMORY[32],MEMORY[12])
MEMORY[34]=""
inter (MEMORY[34],MEMORY[32],MEMORY[13])
MEMORY[35]="distanse 34/33"
dist_3d (MEMORY[35],MEMORY[33],MEMORY[34])
MEMORY[104]="angle entre 5/10"
inter (MEMORY[104],MEMORY[10],MEMORY[6])
MEMORY[105]="angle entre 10/11"
```

```
  inter (MEMORY[105],MEMORY[10],MEMORY[11])
  MEMORY[37]="intersection entre 14/32"
  inter (MEMORY[37],MEMORY[14],MEMORY[32])
  MEMORY[38]="projection point 28/32"
  proj (MEMORY[38],MEMORY[28],MEMORY[32])
  preset (MEMORY[37],10)
  MEMORY[201]="distance entre 38-37"
  dist_3d (MEMORY[202],MEMORY[38],MEMORY[37])
  MEMORY[40]="construction ligne 28/37"
  iline (MEMORY[40],MEMORY[28],MEMORY[37])
  theo (Utp=0.01)
  MEMORY[41]=""
  geo_tol dist (coax,>MEMORY[41],MEMORY[14],MEMORY[40],180.)
  dist_2d (MEMORY[270],MEMORY[26],MEMORY[28])
  dist_2d (MEMORY[271],MEMORY[26],MEMORY[27])
  dist_2d (MEMORY[272],MEMORY[27],MEMORY[28])
  save (refsys,"C:\WTUTOR\DATA\INT31.REF")
endstat
end_program

#include C:\WTUTOR\PROG\INT31.PAT
```