

MESURE  
CONTROLE  
REGULATION  
AUTOMATISME  
INFORMATIQUE  
INDUSTRIELLE  
INGENIERIE

# M congrès mesucora 88

SESSION N° 3

Organisée avec le concours de :

**l'Association Française  
des Qualiticiens (A.F.Q.)**

Mardi 15 novembre 1988

Président : D. BUTZBACH

**L'automatisation du contrôle  
dans les ateliers flexibles**

# COMMUNICATION - LA QUALITE DES RESULTATS OBTENUS DANS LE CONTROLE PAR MACHINES A MESURER TRIDIMENSIONNELLES

PAR M. BOURDET (E.N.S. CACHAN)

## RESUME

La qualité des mesures obtenues par une machine à mesurer tridimensionnelle est la résultante d'un ensemble complexe de composants interférents les uns avec les autres. Après avoir explicité les différentes sources de dispersion il est proposé un modèle d'identification géométrique d'une machine à mesurer permettant d'explicité les différentes méthodes de correction géométrique des machines. Il est ensuite montré à l'aide de résultats expérimentaux l'origine de certaines dispersions dues à l'étalonnage des palpeurs et aux logiciels de mesure.

The quality of measures obtained by a tridimensional Measuring Machine is the result of a complex-set of interfering elements. After a clarification of the origins of the variations, a model of geometrical identification of measuring machine is proposed. This model allows to understand the different methods for geometrical correction. By the experimental results, the origins of some variations caused by the probe calibration and the measurement soft ware are proved. \*

## 1 - INTRODUCTION

La mesure tridimensionnelle a pris une place importante dans les systèmes de production. En effet la rentabilité économique de l'automatisation des moyens de production nécessite un contrôle rigoureux et automatique des spécifications géométriques des pièces produites. L'intégration des machines à mesurer tridimensionnelles dans les ateliers pose aux métrologues le problème essentiel du suivi de la qualité des résultats obtenus. D'autre part la mesure tridimensionnelle apporte, par la richesse de l'information recueillie sur la géométrie des pièces mesurées, de nouvelles possibilités d'interprétation des mesures, elle devrait donc contribuer dans les années à venir à faire évoluer les habitudes de cotation des pièces mécaniques en éliminant les ambiguïtés d'interprétation des spécifications

portées sur un document. Nous nous proposons d'analyser les différentes sources de dispersions obtenues sur les machines à mesurer tridimensionnelles.

## 2 - ORIGINES DES DISPERSIONS

Dans le cas des mesures traditionnelles faites au marbre, le métrologue maîtrise bien la qualité de ses mesures. En effet, les distances sont toutes mesurées suivant une seule direction perpendiculaire au marbre et en référence à un empilage de cales étalons. Il n'en est pas de même dans le cas de mesures tridimensionnelles où le métrologue n'a plus cette notion intuitive de la qualité des distances mesurées, en effet il se trouve en présence d'un ensemble complexe comprenant.

- 1)- Une mécanique composée d'un ensemble de solides déformables montés en série, liés entre eux par des guidages à jeux constants, sans frottement, rigides et sans hystérésis, dont les mouvements relatifs sont identifiés par des capteurs de position.
- 2)- Une électronique de mesure permettant sur ordre donné de relever les valeurs indiquées par les capteurs de position.
- 3)- Un capteur de mesure à déclenchement équipé de palpeurs sphériques lié à un système d'étalonnage basé le plus souvent sur la mesure d'une sphère ou d'un cube de référence.
- 4)- Un logiciel de mesure permettant, à la fois d'identifier les surfaces mesurées par des ensembles de points, de construire de nouvelles surfaces et des repères, et par suite de calculer des distances et des angles.
- 5)- Un logiciel de correction dans le volume de la machine à mesurer capable de compenser par calcul les différents défauts géométriques des trajectoires des mouvements de la machine.

Tout cet ensemble est à prendre en compte pour quantifier la qualité des mesures obtenues. Deux approches complémentaires du problème sont utilisées:

Une première approche est basée sur une méthode globale d'évaluation de la machine, prenant en compte l'ensemble des cinq points définis précédemment. Pour cela on contrôle des étalons matérialisés avec l'ensemble des moyens de mesure de la machine, c'est-à-dire la mécanique, le palpeur, l'électronique, et les logiciels.

La précision des résultats de mesure donne une bonne indication sur la classe de précision de la machine. Les étalons utilisés varient d'une méthode à l'autre, on peut recenser la barre à boules magnétiques (KUN.83), le test de circularité (KNA.83) et le dispositif T.D.S. du Laboratoire National d'Essais (SCH.86) composé de 20 étalons disposés sur un marbre orientable.

Cette méthode globale permet également de donner des indications sur l'origine et le sens de quelques défauts locaux de la machine c'est-à-dire les "justesses globales" des trois dispositifs de mesure des déplacements de la machine et les défauts globaux d'orthogonalité des trois axes de mesure. Cette première approche est bien adaptée au contrôle qualité d'une machine à mesurer. En effet cette méthode est rapide, ne nécessite pas de moyens de mesure externes à la machine, et peut être mise en oeuvre par l'utilisateur, elle met en évidence d'éventuelles erreurs géométriques de la machine mais ne permet pas de les identifier avec suffisamment de précision pour effectuer ensuite une correction géométrique de la machine. Ce constat d'écarts hors tolérance nécessite l'intervention du service de maintenance du constructeur de la machine.

Une deuxième approche consiste à évaluer séparément les performances des cinq points cités précédemment. Pour cela on mesure indépendamment du palpeur et du logiciel de mesure la géométrie de la machine à mesurer avec ou sans son logiciel de correction. On mesure ainsi les différents paramètres métrologiques élémentaires et indépendants caractérisant la géométrie de la machine à mesurer (ZHA.85) et (FER.86). Cette méthode longue à mettre en oeuvre nécessite des moyens de mesure externes à la machine ainsi que des modèles mathématiques d'identification des erreurs systématiques de mesure dans le volume. L'analyse des sources d'erreurs permet ensuite de corriger les écarts géométriques soit mécaniquement, soit par logiciel, cette méthode intéresse donc les fabricants et les services de maintenance des matériels de mesure.

Nous nous proposons d'étudier cette deuxième approche et de donner quelques résultats expérimentaux.

### **3 - MODELE D'IDENTIFICATION GEOMETRIQUE D'UNE MACHINE A MESURER TRIDIMENSIONNELLE**

Une machine à mesurer est le plus souvent constituée de 4 solides liés cinématiquement entre-eux par trois liaisons prismatiques d'axe  $ox$ ,  $oy$ ,  $oz$  montés en série. Un palpeur de centre de sphère de palpation  $P$  lié à l'un des solides extrêmes permet d'enregistrer les

coordonnées  $X_L$ ,  $Y_L$ ,  $Z_L$  lues sur 3 capteurs de position placés parallèlement aux directions principales des trois guidages. La technologie utilisée dans la conception des machines à mesurer permet d'obtenir une grande raideur dans les liaisons et par suite de faire l'hypothèse que les comportements géométriques des différentes liaisons sont indépendants et sans hystérésis.

Les repères attachés aux différents solides sont choisis d'axes parallèles aux directions générales des trois liaisons prismatiques ; ils ont pour origine une position particulière du curseur de lecture de chacune des règles de mesure, ainsi nous avons par exemple pour une machine à mesurer de type Trusquin (figure 1):

- l'origine  $O$  attachée au marbre ( $S_0$ ) correspondant à la position zéro du curseur de la règle de mesure  $X_L$ .
- les origines  $O_1$  du chariot longitudinal ( $S_1$ ) et  $O_2$  du chariot vertical ( $S_2$ ) sont confondues avec le curseur de lecture des deux règles  $X_L$  et  $Y_L$ .
- l'origine  $O_3$  du chariot transversal ( $S_3$ ) est confondue avec la position zéro du curseur de lecture de la règle  $Z_L$ .

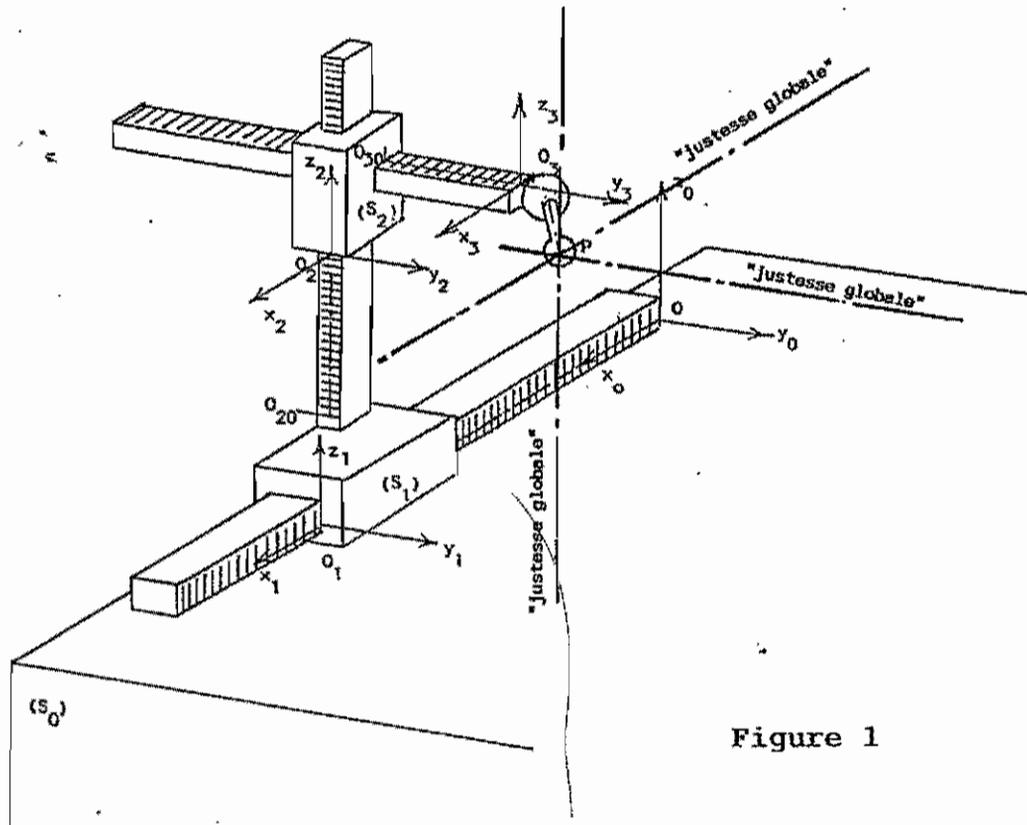


Figure 1

Si  $X_L$ ,  $Y_L$  et  $Z_L$  sont les coordonnées lues par les trois capteurs<sup>L</sup> de position on a :

$$\begin{aligned} \vec{O_0 O_1} &= X_L \vec{x}_0 \\ \vec{O_1 O_2} &= a_1 \vec{x}_1 + b_1 \vec{y}_1 + (c_1 + Z_L) \vec{z}_1 \\ \vec{O_2 O_3} &= a_2 \vec{x}_2 + (b_2 + Y_L) \vec{y}_2 + c_2 \vec{z}_2 \\ \text{et } \vec{O_3 P} &= a_3 \vec{x}_3 + b_3 \vec{y}_3 + c_3 \vec{z}_3 \end{aligned}$$

où les constantes  $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$  sont liées à la morphologie de la machine et les constantes  $a_3, b_3$  et  $c_3$  à celle du palpeur de mesure de centre P

Différents écarts systématiques peuvent être pris en compte de la façon suivante:

3.1 Les écarts systématiques dus aux défauts géométriques des 3 liaisons prismatiques peuvent être caractérisés par des torseurs de petits déplacements exprimant aux points  $O_1, O_2, O_3$  les 5 écarts géométriques (3 rotations et 2 translations) de chacune des liaisons. (BOU.72).

$$\begin{aligned} \text{Liaison } S_1/S_0 & \left\{ \tau_{1/0} \right\}_{O_1} \left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 [X_L] \\ \beta_1 [X_L] \\ \gamma_1 [X_L] \end{array} \right\} \left| \vec{R}_1 \right. \begin{array}{l} 0 \\ v_1 [X_L] \\ w_1 [X_L] \end{array} \left| \left\{ \vec{T}_1 \right\}_{O_1} \right. \\ \text{Liaison } S_2/S_1 & \left\{ \tau_{2/1} \right\}_{O_2} \left\{ \begin{array}{l} \alpha_2 [Z_L] \\ \beta_2 [Z_L] \\ \gamma_2 [Z_L] \end{array} \right\} \left| \vec{R}_2 \right. \begin{array}{l} u_2 [Z_L] \\ v_2 [Z_L] \\ 0 \end{array} \left| \left\{ \vec{T}_2 \right\}_{O_2} \right. \\ \text{Liaison } S_3/S_2 & \left\{ \tau_{3/1} \right\}_{O_3} \left\{ \begin{array}{l} \alpha_3 [Y_L] \\ \beta_3 [Y_L] \\ \gamma_3 [Y_L] \end{array} \right\} \left| \vec{R}_3 \right. \begin{array}{l} u_3 [Y_L] \\ 0 \\ w_3 [Y_L] \end{array} \left| \left\{ \vec{T}_3 \right\}_{O_3} \right. \end{aligned}$$

L'écart systématique de mesure résultant de la chaîne cinématique des différents solides peut être lui aussi caractérisé par un torseur exprimant le petit déplacement entre le solide porte palpeur ( $S_3$ ) et le marbre porte pièce ( $S_0$ ). Ainsi on aura la relation cinématique entre les torseurs (CLE.72).

$$\tau_{3/0} = \tau_{3/2} + \tau_{2/1} + \tau_{1/0}$$

que l'on peut exprimer au point de mesure P.

$$\text{Soit } \left\{ \tau_{3/0} \right\}_P \left\{ \begin{array}{l} \vec{R}_{3/0} \\ \vec{D}_{3/0} \end{array} \right\}_P$$

3.2 Les défauts de parallélisme entre les axes du repère orthonormé lié à la machine à mesurer et les directions des différentes règles de mesure étant suffisamment petits, on considère que les écarts de justesse des règles de mesures  $J_x(X_L)$ ,  $J_y(Y_L)$ ,  $J_z(Z_L)$  sont portés par les axes orthonormés  $O_1x_0$ ,  $O_3y_3$  et  $O_2z_2$

3.3 Les déplacements relatifs des solides au cours du fonctionnement ainsi que les variations de température  $\Delta T$  engendrent des déformations élastiques de la machine. Les écarts ainsi créés peuvent être modélisés par des lois de déformation et d'allongement que l'on notera:

$$\varepsilon_{00_1}^j [\Delta T] ; \varepsilon_{0_1 0_2}^j [X_L, Y_L, Z_L, \Delta T] ; \varepsilon_{0_2 0_3}^j [X_L, Y_L, Z_L, \Delta T]$$

avec  $j = x, y, z$

Les coordonnées corrigées  $x_p, y_p, z_p$  du point P centre du palpeur, exprimées dans un repère orthonormé  $O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0$  sont les coordonnées  $X_L, Y_L, Z_L$  lues par les règles de mesure augmentées de l'ensemble des écarts systématiques décrits précédemment (BOU.87).

Soit par exemple pour l'axe x :

$$X_p = X_L + a_1 + a_2 + a_3 + \varepsilon_{00_1}^x [\Delta T] + \varepsilon_{0_1 0_2}^x [Y_L, Z_L, \Delta T, \Delta Q] + \varepsilon_{0_2 0_3}^x [Y_L, \Delta T, \Delta Q] + J_x [X_L] + u_3 [Y_L] - b_3 \gamma_3 [Y_L] + c_3 \beta_3 [Y_L] + u_2 [Z_L] - (b_2 + b_3 + \gamma_L) \gamma_2 [Z_L] + (c_2 + c_3) \beta_2 [Z_L] - (b_1 + b_2 + \gamma_L) \gamma_1 [X_L] + (c_1 + c_2 + c_3 + z_L) \beta_1 [X_L]$$

Nous remarquons que pour tout point de mesure ( $X_L, Y_L, Z_L$ ) et dans un repère orthogonal, (les 3 défauts d'orthogonalités des axes étant choisis nuls), la connaissance de 15 écarts géométriques des trois liaisons prismatiques, des 3 écarts de justesse des règles de mesure, et des 7 fonctions de déformation élastique et d'allongement des solides permet de corriger les défauts systématiques d'une machine à mesurer considérée comme un assemblage rigide de solides déformables.

#### 4 - MESURE DES 21 DÉFAUTS SYSTÉMATIQUES

Nous considérons dans la suite de cet exposé que les déformations sont connues ou négligeables. Les 21 défauts restants peuvent être mesurés soit globalement dans la zone de mesure de la machine, soit systématiquement au niveau de chaque guidage.

4.1 Approche globale de la mesure :

On mesure par interférométrie laser 3 "justesses globales", pour cela on fait décrire successivement au point P trois déplacements parallèles

aux axes de la machine, la mesure est choisie au "centre" de la zone de travail. La machine à mesurer se trouve donc corrigée parfaitement pour un seul point P du solide  $S_3$  décrivant les 3 trajectoires d'étalonnage supposées orthogonales (figure 1). Cette démarche revient à placer, par le calcul, les règles de mesure au centre de la zone de travail de la machine, il est évident que si l'on s'éloigne de ces trois droites d'étalonnages ou si l'on utilise un palpeur dont le point de mesure P' s'éloigne du point d'étalonnage P, la machine n'est plus corrigée. Cette approche globale impose d'une part que les trois directions des déplacements de la machine soient effectivement réglées orthogonales, et d'autre part l'étalonnage des justesses nécessite que l'incrément de chaque mesure soit dix fois plus faible que celui affiché par les règles, par exemple un micron pour un affichage au centième. La formule de correction pour chaque axe est alors de la forme :

$$X_p = X_L + J(X_L).$$

A la correction des 3 "justesses globales" de la machine peut être superposée une correction globale des 3 défauts d'orthogonalité des 3 directions des déplacements. Pour cela on mesure une distance matérialisée connue, placée à + 45° puis à - 45° par rapport aux axes, les écarts entre les distances mesurées et la distance d'étalonnage permettent de définir globalement les défauts d'orthogonalité moyens des 3 axes pris deux à deux.

On obtient pour chaque axe une formule de correction du type :

$$X_p = X_L + J(X_L) + K_{xy} \cdot Y_L + K_{xz} \cdot Z_L$$

4.2 Approche détaillée de chaque écart : (MOR.88 ; LEH.87).

Les mesures se font en deux temps, dans un premier temps on identifie séparément par mesure les 15 écarts dus aux guidages de la machine ainsi que les trois justesses des règles, ces mesures sont faites axe par axe. Les écarts angulaires sont mesurés directement par niveau électronique ou par mesure différentielle de deux comparateurs électroniques, les rectitudes et les justesses sont calculées à partir de mesures effectuées au "centre" de la zone de travail de la machine. On observe que les 3 justesses et les 9 écarts angulaires trouvés sont indépendants de la direction des axes de déplacements choisie, par contre les 6 défauts de rectitude sont chacun connus à une direction générale de mesure près. Choisies arbitrairement ces directions ne

sont jamais orthogonales. On est donc amené dans un deuxième temps à identifier les 3 défauts d'orthogonalité des 6 directions générales de mesure prises deux à deux. Une méthode consiste à mesurer une distance matérialisée connue, placée successivement dans chaque plan des axes à + 45° puis à - 45° par rapport aux axes. Les mesures sont faites en appliquant la correction des 18 défauts déjà identifiés, les différences sur les longueurs trouvées sont dues uniquement aux 3 défauts angulaires que l'on calcule immédiatement.

## 5 - ECARTS DUS A L'ETALONNAGE DES PALPEURS

Les palpeurs à déclenchement sont le plus souvent étalonnés par mesure d'une sphère de référence fixée sur la table de la machine à mesurer. On se place ici dans le cas où la vitesse d'accostage d'un point de mesure est compatible avec l'électronique utilisée et la précision désirée. On peut dans la pratique constater des temps de réponse entre le déclenchement du palpeur et l'acquisition effective des coordonnées allant de 2  $\mu$ s à 20 millisecondes suivant que l'on utilise une solution câblée ou une solution logiciel. Le choix d'un coffret d'acquisition est donc très important sur une machine à mesurer où la vitesse d'accostage ne peut être contrôlée, ceci est particulièrement important dans le cas de machines à mesurer manuelles.

Le palpeur est constitué d'une sphère de palpation dont le diamètre est choisi en fonction de l'accessibilité des surfaces de la pièce à contrôler. Lors de l'étalonnage des différents palpeurs l'accessibilité de la sphère de référence est différente d'un palpeur à un autre, il s'en suit que les points de contact sphère-palpeur sphère-de-référence choisis varient d'un étalonnage à l'autre, cette variation est une source non négligeable d'imprécision qui se répercute principalement sur les mesures effectuées entre deux surfaces palpées par deux palpeurs différents. On minimisera ces défauts en palpant la sphère de références dans des plans parallèles aux plans des déplacements de la machine, en choisissant des points de mesure symétriques, et en balayant la sphère de référence suivant une calotte sphérique la plus grande possible et de préférence supérieure à une demie sphère (BIS.88).

## 6 - DISPERSIONS DUES AUX LOGICIELS DE MESURE

Les logiciels de mesure tridimensionnelle utilisent des algorithmes de calcul permettant d'associer à chaque ensemble de points mesurés sur une surface un élément géométrique parfait, puis de construire de

nouveaux éléments géométriques, enfin de calculer des distances et des angles. Les méthodes d'optimisation utilisées varient d'un logiciel à un autre, elles sont liées directement à la performance du logiciel et par suite elles sont tenues secrètes par leurs auteurs, seul le critère d'optimisation est en général connu (BOU.84). Ainsi, un même ensemble de points mesurés, soumis à deux algorithmes différents, donne le plus souvent pour un même critère d'optimisation deux résultats différents. Cette non-unicité dans les algorithmes d'optimisation est une source de dispersions dans les résultats obtenus par un client et par un fournisseur utilisant deux machines à mesurer de marques différentes.

A titre d'exemple nous allons montrer les dispersions dans les résultats de l'optimisation d'un cercle obtenu par différents critères (MIR.86).

Nous pouvons recenser les critères d'optimisation suivants : (BOU.87).

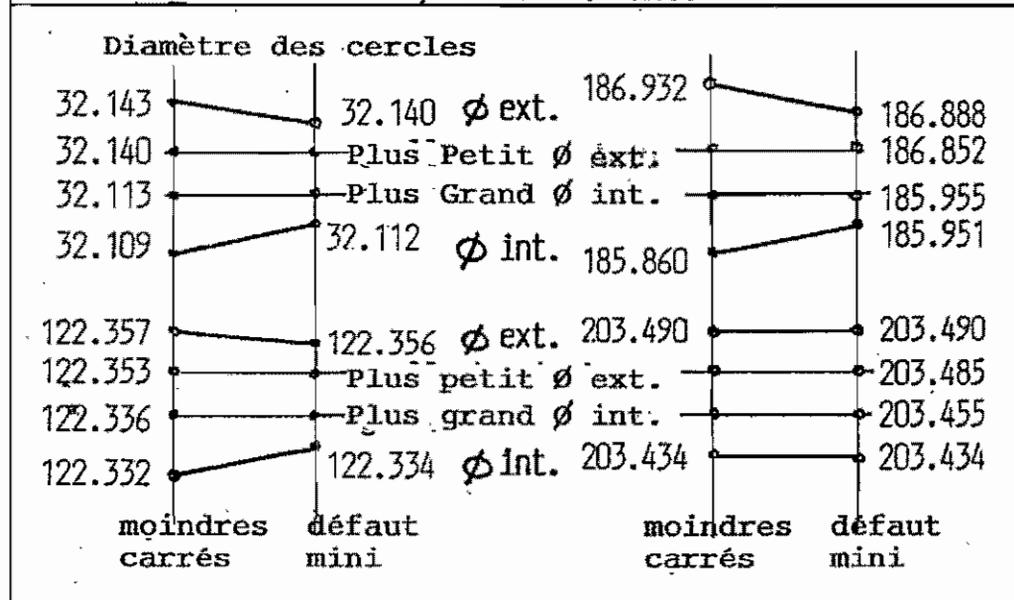
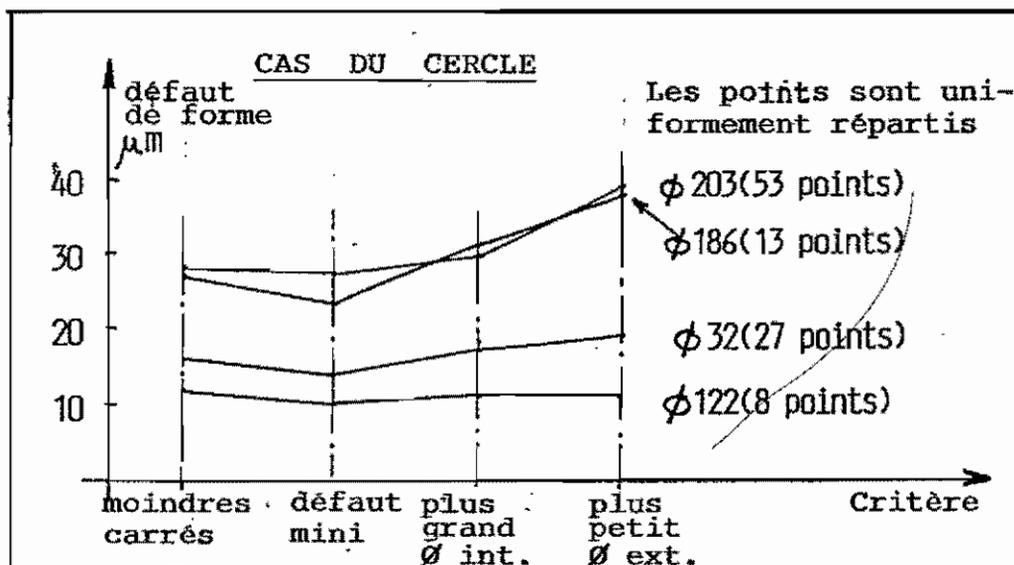
- 1 - le cercle moyen des moindres carrés,
- 2 - le cercle moyen du plus petit défaut de forme,
- 3 - le plus grand cercle tangent intérieur,
- 4 - le plus petit cercle tangent extérieur,
- 5 - le cercle des moindres carrés tangent extérieur,
- 6 - le cercle des moindres carrés tangent intérieur,
  
- 7 - le cercle du plus petit défaut de forme tangent extérieur,
- 8 - le cercle du plus petit défaut de forme tangent intérieur.

Nous avons comparé les résultats obtenus par les critères 3 à 8 sur le défaut de forme et le diamètre du cercle (tableau 2).

A partir d'un même ensemble de points mesurés on remarque que pour un cercle de diamètre 122 mm, de défaut de forme mini de  $10\mu$  on observe une dispersion de  $4\mu$  sur les diamètres du cercle obtenu par les différents critères, et que pour un cercle de diamètre 186 mm de défaut de forme mini de  $25\mu$  la dispersion sur les différents diamètres intérieurs est cette fois de  $95\mu$ .

Cet exemple montre bien la nécessité d'utiliser dans les logiciels un critère normalisé et non plus nécessairement le critère des moindres carrés.

Le mode de calcul des distances entre éléments géométriques apporte également des dispersions importantes dans les résultats, prenons par exemple le cas classique de deux plans parallèles où la distance



Nb Pts	Moindres carrés	Déf. mini	Gain	Gain %
4	0.3457	0.3354	0.0103	3 %
16	0.0380	0.0325	0.0055	16 %
8	0.0126	0.0108	0.0118	16 %
27	0.0167	0.0140	0.0027	19 %
13	0.5360	0.4687	0.0673	14 %
53	0.0284	0.0279	0.0005	1.8 %

**TABLEAU 2**

peut être exprimée par :(MIT.82)

le Sup ou l'Inf des distances entre les points de mesure du plan  $P_1$  au plan idéal  $P_2$ , ou vice versa, le Sup ou l'Inf des distances entre les points de mesure du plan  $P_2$  au plan idéal  $P_1$ .

La distance du milieu du plan idéal  $P_1$  au plan idéal  $P_2$  (et vice versa).

La distance la plus grande du contour du plan idéal  $P_1$  au plan  $P_2$  (et vice versa).

Il est également possible d'optimiser directement à partir des points mesurés, la plus petite ou la plus grande distance séparant deux plans parallèles tangents, du côté libre. Cette solution ne peut être traitée que par une machine à mesurer reliée à un ordinateur, mais elle montre bien les nouvelles possibilités offertes par la mesure tridimensionnelle.

L'interprétation de la distance entre deux plans est donc laissée au choix de l'opérateur, le dessin de définition ne donnant pas suffisamment de précision sur la méthode à utiliser.

## 7 - CONCLUSION

La richesse des informations recueillies par la mesure tridimensionnelle autorise de nouvelles possibilités d'interprétation sur la géométrie des pièces mécaniques, elle peut permettre ainsi de vérifier directement les fonctionnalités d'une pièce, par exemple vérifier globalement si un tube formé de nombreux cintres est inscrit dans une enveloppe tout en respectant des contraintes d'orientation d'entrée et de sortie du tube (MFO.88), si un assemblage de plusieurs surfaces est possible (BOU.87) etc..., la cotation devra donc nécessairement tenir compte de ces nouvelles possibilités.

La maîtrise de la qualité des mesures obtenues par les machines à mesurer tridimensionnelles nécessite deux approches complémentaires, une approche globale permettant par mesure d'étalons matérialisés de vérifier la non variation de l'ensemble machine, électronique, palpeur, logiciels de correction, logiciel de mesure, et une approche permettant d'analyser séparément les différentes sources de dispersion, cette approche nécessaire aux fabricants de machine à mesurer permet à l'utilisateur de tenir compte de ces défauts au niveau de

l'élaboration des gammes de contrôle.

La diminution du coût des règles de mesure, de l'électronique et du calcul devrait permettre dans les quelques années à venir d'effectuer en temps réel la mesure et par suite la correction des écarts géométriques des machines à mesurer, cette évolution permettra ainsi de maîtriser en temps réel la qualité des mesures obtenues.

#### BIBLIOGRAPHIE

- BIS.88 S. BISSON  
"Digitalisation d'une forme complexe sur MMT:  
Etude expérimentale de la dispersion des repères  
de référence"  
LURPA - "DEA de Production Automatisée"  
Mémoire de Recherche, Juin 1988.
- BOU.72 P. BOURDET  
"Optimisation des montages d'usinage"  
Contrat de Recherche DRME 1972.
- BOU.87 P. BOURDET  
"Contribution à la mesure tridimensionnelle:  
modèle d'identification géométrique des  
surfaces, métrologie fonctionnelle des pièces  
mécaniques, correction géométrique des machines  
à mesurer tridimensionnelles"  
Thèse de Docteur-ès-Sciences - Université de  
Nancy I, Juin 1987.
- BOU.84 P. BOURDET, A. CLEMENT, R. WEILL  
"Methodology and comparative study of optimal  
identification processes for geometrically  
defined surfaces"  
Proceedings of International Symposium on  
Metrology for Quality Control in Production,  
TOKYO 1984.
- CLE.72 A. CLEMENT  
"Mobilité des chaînes cinématiques complexes"  
STROSNICKY CASOPIS (Tchécoslovaquie)  
Tome XXIII, Fac. 2, 1972, p. 5-7.
- FER.86 P.M. FERREIRA - C.R. LIU - E. MERCHANT  
"A contribution to the analysis and compensation  
of the geometric error of a machining center"  
Annals of the C.I.R.P., vol. 35/1/1986.

- KNA.83 W. KNAPP, E. MATTHIAS, ETH SURICH  
 "Test of the three - Diminsional uncertainty of machine tools and measuring machines and its relation to the machine errors"  
 Annals of the C.I.R.P. vol. 32/1/1983.
- KUN.83 H. KUNZMANN, F. WALDELE  
 "On testing coordinate measuring machines (CMM) with kinematic reference standards (KRS)"  
 Annals of the C.I.R.P., vol. 32/1/1983
- LEH.87 P. LE HUEROU  
 "Caractérisation d'une machine à mesurer - Analyse et expérimentation"  
 L.U.R.P.A. - D.E.A. de production automatisée  
 Mémoire de Recherche, Juin 1987
- MFO.88 Société M.F.O. (ARGENTEUIL)  
 "LURPA-TUBE Logiciel de contrôle du tube cintré"  
 Mai 1988
- MIR.86 Th. MIRONNEAU  
 "Etude comparative des méthodes d'optimisation des surfaces en métrologie dimensionnelle"  
 L.U.R.P.A. - D.E.A. de production automatisée  
 Mémoire de Recherche, Juin 1986
- MIT.82 "La technique de mesure à 3 coordonnées"  
 Ecole TECHNISCHE RUNDOCHA N°40, 1982
- MOR.88 J. MOREAU  
 "Caractérisation d'une machine à mesurer - procédure de correction"  
 Mémoire  
 Diplôme Ingénieur C.N.A.M., 1988
- POR.86 C. PORTA  
 "Testing of three coordinate measuring machine evaluation algorithms"  
 Commission of the European Communities  
 Applied Metrology - Reference Materials, 1986
- SCH.86 B. SCHATZ  
 "Etude d'un étalon tridimensionnel pour la vérification des machines à mesurer 3D"  
 Journées du CUPRAM, nov.86
- ZHA.85 G. ZHANG, R. VEALE, T. CHARLTON, B. BORDCHARDT  
 R. HOUKEN  
 "Coordinate measuring machines (CMM) with kinematic reference standards (KRS)"  
 Annals of the C.I.R.P., vol. 32/1/1983