

Commande adaptative dimensionnelle d'une machine à mesurer tridimensionnelle

A. Clément (2), P. Bourdet (2) — Submitted by R. Weill (1)

We demonstrate it is possible to write the equations of the true trajectory of point of a "tool" on a machine. Relying upon the hypothesis that systematic errors prevail, we modelise the movements of the machine within a curvilinear coordinate system. That system of curved coordinates can be deduced from the theoretical rectangular coordinate system through a displacement field and the associated deformation tensor. We show an original (patented) experimental method to measure that tensor and propose three coefficients characterising the quality of a machine.

INTRODUCTION :

Actuellement le progrès en précision des machines-outils, des machines à mesurer tridimensionnelles et des robots, exige la prise en compte des défauts systématiques de "l'outil" provenant soit des erreurs de fabrication, soit des efforts appliqués, soit des variations de température.

Cette prise en compte se fait actuellement par deux approches distinctes :

- La mesure des erreurs de positions et de forme des glissières de la machine : c'est la métrologie classique. C'est long, coûteux et utile uniquement pour définir la classe de la machine, c'est en effet peu exploitable sur le plan pratique.
- Les essais pratiques : c'est à dire l'usinage (cas des machines-outils) ou le mesurage (cas des robots et des machines à mesurer 3 D) d'une pièce normalisée ou d'une pièce typique. Ces essais sont très utiles pour définir les performances réelles de la machine dans un cas précis, mais ils ne peuvent être étendus à des cas différents, faute d'une modélisation adéquate.

C'est pourquoi il est nécessaire de mettre au point un modèle mathématique susceptible de décrire les erreurs de trajectoires dans n'importe quelle configuration.

Le modèle que nous proposons ici est celui d'un champ de déplacement infiniment petit à partir d'une position de référence initiale, tout à fait analogue aux champs de déplacement en variables lagrangiennes qu'on utilise en mécanique des milieux continus.

Pour simplifier l'exposé nous appliquerons directement la méthode au cas de la machine à mesurer tridimensionnelle mais la méthode s'applique à n'importe quelle forme de machines-outils moyennant une légère modification adéquate (emploi des coordonnées cylindriques ou des coordonnées sphériques par exemple). Il est dès lors possible de calculer la vraie position en temps réel : c'est ce que nous appelons la commande adaptative dimensionnelle.

LES HYPOTHESES DE DEPART :

Il s'agit d'introduire les transformations géométriques d'un repère cartésien orthonormé au voisinage d'un point sous l'effet des erreurs de rectitude et d'orthogonalité des glissières d'une machine qui sont sensées représenter ce repère cartésien.

On peut classer ces transformations en 3 groupes :

- La translation et la rotation du repère global.
- La translation et la rotation du repère local.
- La déformation du repère local consistant en variation des longueurs et des angles des vecteurs issus du point M.

Les hypothèses retenues sont les hypothèses classiques des milieux continus :

- Les déplacements sont continus. Ce qui impose que la machine soit sans jeux ou que les jeux soient toujours rattrapés dans le même sens.
- Les déplacements et les déformations du repère local sont infiniment petits. Cette hypothèse est très bien vérifiée dans les machines modernes dont les défauts sont de l'ordre de quelques centièmes de millimètre sur de très grandes longueurs.

EXPOSE DE LA METHODE. (Cas des coordonnées cartésiennes).

Dans cette méthode on considère l'espace tridimensionnel de la machine rapporté à un système d'axes orthonormés, tel que les points voient leurs coordonnées mesurées non pas sur ce système d'axes, mais en fait sur un système de coordonnées curvilignes, défini par les trajectoires réelles d'un point caractéristique de la machine.

Le triplet $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$ représente pour l'opérateur les

coordonnées du point Mth dans le repère cartésien, il représente en réalité les coordonnées du point Mr dans un système de coordonnées curvilignes qui ne coïncide en rien avec le repère cartésien supposé, qu'il s'agit en fait de définir, comme nous le montrons plus loin.

Désignons par $\vec{U}(M)$ le vecteur Mth Mr

$$\vec{U}(M) = \vec{Mth} - \vec{Mr}$$

$$\text{Soit : } \vec{Mr} = \vec{Mth} + \vec{U}(M) \quad (1)$$

Le vecteur $\vec{U}(M)$ est un vecteur déplacement fonction du point M. Il constitue donc un champ de vecteurs que nous appellerons "Champ de déplacement".

Nous supposons constamment par la suite que ce vecteur $\vec{U}(M)$ est défini par ses projections sur le repère cartésien. Du fait que Mth est défini par hypothèse dans le même repère, la formule (1) permet de calculer les coordonnées cartésiennes de Mr, si l'on connaît $\vec{U}(M)$.

N.B. Il importe de ne pas confondre le champ $\vec{U}(x,y,z)$ avec la courbe $u(x)$ ou $u(y)$ ou $u(z)$ relevée habituellement lorsqu'on contrôle une glissière.

Comme l'indique clairement les notations on a :

$$\vec{U}(x, 0, 0) = \vec{u}(x)$$

$$\vec{U}(0, y, 0) = \vec{u}(y)$$

$$\vec{U}(0, 0, z) = \vec{u}(z)$$

Le vecteur champ $\vec{U}(M)$ n'a donc aucun rapport direct avec les mesures faites habituellement sur une machine. Nous donnerons plus loin son expression analytique et la méthode expérimentale de détermination.

Si pour l'instant, on suppose connu le champ $\vec{U}(M)$ on a immédiatement les 2 principales applications suivantes :

- Détermination de la trajectoire réelle de "l'outil"

$$\text{On a : } \vec{Mr} = \vec{Mth} + \vec{U}(M)$$

Par exemple pour une droite d'équations $\begin{cases} x = a + pz \\ y = b + qz \\ z = z \end{cases}$

Il vient immédiatement :

$$\begin{aligned} x' &= a + pz + Ux \quad (a + pz, b + qz, z) \\ y' &= b + qz + Uy \quad (a + pz, b + qz, z) \\ z' &= z + Uz \quad (a + pz, b + qz, z) \end{aligned}$$

b) Détermination des erreurs de position angulaire de la broche.

Pour calculer les défauts angulaires à partir d'un champ de déplacement il faut déterminer le gradient du champ qu'on appelle habituellement " tenseur de déformation".

On sait que pour un champ $\overline{U}(M)$ on a :

$$\overline{D} = \text{grad } \overline{U}(M) = \begin{pmatrix} \frac{\partial U_x}{\partial x} & \frac{\partial U_x}{\partial y} & \frac{\partial U_x}{\partial z} \\ \frac{\partial U_y}{\partial x} & \frac{\partial U_y}{\partial y} & \frac{\partial U_y}{\partial z} \\ \frac{\partial U_z}{\partial x} & \frac{\partial U_z}{\partial y} & \frac{\partial U_z}{\partial z} \end{pmatrix}$$

Ce tenseur $\overline{D}$ peut se décomposer en tenseur symétrique et en tenseur antisymétrique tels que :

$$\overline{D} = \overline{\Omega} + \overline{\epsilon}$$

$$\text{avec } \overline{\Omega} = \frac{\overline{D} - \overline{D}^T}{2} \quad \overline{\epsilon} = \frac{\overline{D} + \overline{D}^T}{2}$$

$\overline{D}^T$ étant le tenseur transposé de $\overline{D}$.

On utilise à présent les notations suivantes :

$$\overline{Ux} = u \quad \overline{Uy} = v \quad \overline{Uz} = w$$

La variable par laquelle on effectue la dérivation étant notée en indice.

Le tenseur $\overline{\Omega}$ représente la rotation du repère local.

$$\text{avec } \overline{\Omega} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} (w'y - v'z) \\ \frac{1}{2} (u'z - w'x) \\ \frac{1}{2} (v'x - u'y) \end{pmatrix}$$

Il représente la rotation des axes principaux de $\overline{D}$.

Le tenseur $\overline{\epsilon}$ représente la déformation pure du repère local.

$$\overline{\epsilon} = \begin{pmatrix} u'x \frac{1}{2} (u'z + u'x) & \frac{1}{2} (u'z + w'x) \\ \frac{1}{2} (v'x - v'y) & v'y \frac{1}{2} (v'z + w'y) \\ \frac{1}{2} (u'z + w'x) & \frac{1}{2} (u'z + w'x) w'z \end{pmatrix}$$

Au total un vecteur $\overline{V}$ issu d'un point M va subir successivement les transformations suivantes :

- La translation $\overline{U}(M)$
- La rotation $\overline{\Omega}$
- La déformation $d\overline{V} = \overline{\epsilon} \cdot \overline{V}$

L'application directe de ceci débouche sur la détermination de la position angulaire exacte de l'axe de la broche d'une machine qu'on peut imaginer porté par l'axe V.

DETERMINATION THEORIQUE ET EXPERIMENTALE DU CHAMP

$\overline{U}(M)$.

La détermination du champ $\overline{U}(M)$ comporte deux aspects différents et complémentaires qu'il importe de bien séparer : L'aspect " choix d'un repère cartésien de référence ", l'aspect " déformation et déplacement de ce repère ".

Le champ $\overline{U}(M)$ représente le déplacement qu'il faut faire subir aux points d'un repère cartésien pour l'appliquer sur le repère curviligne. Mais seul le repère curviligne est parfaitement défini (par les glissières de la machine.) Il existe une large indétermination au niveau du choix du repère cartésien. Tous ces repères se déduisant les uns des autres par une translation et une rotation.

Soit :

$$\overline{U}(M) = \underbrace{\overline{T} + \overline{\omega} \wedge \overline{M}_0}_{\substack{\text{translation} \\ + \text{rotation} \\ \text{du repère } R1/R2}} + \overline{W}(M)$$

Nous choisirons le repère cartésien R_0 qui " coïncide au mieux " avec le repère curviligne au sens des moindres carrés. Ce choix se justifie largement par le fait qu'alors $|\overline{U}(M)|$ est minimum.

On définit ainsi la première transformation géométrique qui permettra d'appliquer le repère curviligne sur le repère cartésien R_0 .

La deuxième transformation est la transformation qui amène le repère local à coïncider avec R_0 . D'après le paragraphe précédent on a :

$$\overline{W}(M) = \underbrace{\overline{T} + \overline{\omega} \wedge \overline{M}_0}_{\substack{\text{Translation} \\ + \text{rotation} \\ \text{du repère} \\ \text{local sur } R_0}} + \underbrace{\overline{D}(M)}_{\substack{\text{Déformation} \\ \text{propre locale}}}$$

Enfin la troisième et dernière transformation est la déformation pure locale qui permet de calculer la déformation $d\overline{V}$ d'un vecteur $\overline{V}$ par la relation

$$d\overline{V} = \overline{\epsilon} \cdot \overline{V}$$

Lorsqu'on ajoute successivement ces 3 transformations on peut, sans difficulté, exprimer un vecteur $\overline{V}$ (en coordonnées curvilignes) dans le repère cartésien R_0 .

On peut, donc à présent, passer du repère cartésien au repère curviligne et du repère curviligne au repère cartésien aussi bien pour les points que pour les vecteurs.

Il ne reste donc plus qu'à déterminer expérimentalement le champ $\overline{U}(M)$ pour résoudre entièrement le problème.

PROCEDURE D'IDENTIFICATION DU CHAMP $\overline{U}(M)$

L'intérêt fondamental du procédé que nous proposons ici est qu'il ne nécessite aucun instrument de mesure autre que les propres compteurs de la machine, ni de pièces étalons ayant des dimensions précises connues. Il suffit de disposer d'un marbre dont seule la forme plane est utile, ou d'ailleurs de toute autre forme parfaite (cylindre, sphère...) indépendamment de leurs dimensions.

L'idée de base est la suivante :

Le défaut de planéité apparent du marbre indique en réalité une " courbure " du système de coordonnées.

Par exemple on comprend clairement qu'une règle parfaite AB placée sur l'axe $y = 10$ fera apparaître les défauts de rectitude $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ pour l'opérateur, bien que la règle soit parfaite et que seule la " courbure " du système de coordonnées soit en cause.

On procède alors de la manière suivante :

- On palpe la sphère de dégauchissage pour associer d'une manière unique les coordonnées curvilignes aux glissières de la machine.

b) On palpe 3 points du marbre (dans le cas évident où l'on prend un plan comme étalon, autrement on palpe le nombre de points correspondant à l'ordre de la surface). On peut définir ainsi la position du plan dans le repère curviligne.

c) On se donne alors un modèle de champ de déplacement.
L'expérience montre qu'on peut prendre par exemple :

$$U_x(M) = A + Bx + Cy + Dz + Ex^2 + Fy^2 + Gz^2 + Hxy + Inz + Jyz$$

$$U_y(M) = A' + B'x + C'y + D'z + E'x^2 + F'y^2 + G'x^2 + H'xy + I'xz + J'yz$$

$$U_z(M) = A'' + B''x + C''y + D''z + E''x^2 + F''y^2 + G''x^2 + H''xy + I''xz + J''yz$$

d) On procède alors au palpé systématique du marbre, le défaut de planéité apparent est évidemment dû à la courbure de l'espace de la machine c'est $U(M)$.

La recherche du défaut de planéité d'un marbre est une opération classique qui ne représente aucune difficulté.

e) Pour augmenter la précision de la détermination on recommence plusieurs fois la même opération en changeant la position du marbre à chaque fois pour explorer tout l'espace de la machine.

f) Dans le cas d'une machine-outil, ou d'un robot il est nécessaire pour réaliser l'expérimentation (ces machines ne sont pas en effet destinées à mesurer un défaut de planéité) de remplacer l'outil par une sonde (type Renishaw) qui au moment du contact avec le marbre émet un signal donnant l'ordre à l'ordinateur (ou à l'opérateur) de lire les compteurs de la machine.

Par conséquent on peut adopter facilement la méthode aux cas de toute machine à codage de position analogique ou numérique. (Une table à dessiner par exemple), même en cours de travail.

PROPOSITIONS POUR UNE DEFINITION DE LA QUALITE D'UNE MACHINE.

Le problème qui se pose constamment au niveau de n'importe quelle machine, mais spécialement des machines à mesurer 3D, est celui du critère de qualité dimensionnelle. Il règne actuellement une grande confusion dans ce domaine, du fait en particulier, du caractère arbitraire du choix du référentiel initial R_0 .

C'est pourquoi, il est nécessaire, pour s'affranchir du choix arbitraire de R_0 , d'utiliser comme critère de qualité des coefficients caractéristiques des transformations géométriques qui font passer du repère cartésien au repère curviligne.

Si l'on suppose donné, dans le repère cartésien, un cube parfait de dimension unité, ce même cube subit les transformations géométriques précédentes, pour être réalisé dans le repère curviligne. Pratiquement c'est ce qui se passe lorsque sur une machine-outil on tente d'usiner ce cube, c'est également ce qui se passe sur une machine à mesurer tridimensionnelle lorsqu'on mesure un cube étalon.

La description des déformations du cube traduira donc les déformations de l'espace de la machine, donc les défauts de cette machine.

On peut caractériser très simplement les déformations du cube par :

a) Son défaut d'orientation dans l'espace.

(Par exemple ses faces ne sont pas exactement parallèles aux plans de références de la machine.)

b) Son défaut dimensionnel. (Par exemple le côté parallèle à l'axe x n'est pas exactement égal à 1.)

c) Son gauchissement. (Qu'il ne faut pas confondre avec le défaut d'orientation). Par exemple l'arête X n'est pas exactement perpendiculaire à l'arête Y .

Nous pouvons traduire ces 3 sortes de défaut, en un point de l'espace de la machine, par le calcul de 3 coefficients C_1, C_2, C_3 à partir des invariants du tenseur de rotation $\bar{\Omega}$ et du tenseur de déformation $\bar{\epsilon}$.

$$a) C_1 = (\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2) / 2$$

C'est le deuxième invariant du tenseur $\bar{\Omega}$. Le vecteur " défaut d'orientation " $\bar{\Omega}$ a comme composantes α, β, γ .

Le coefficient C_1 représente donc le module du vecteur $\bar{\Omega}$.

$$b) C_2 = \frac{\Delta V}{V}$$

Le défaut dimensionnel sera exprimé par la variation relative de volume du cube élémentaire. Sur le plan mathématique C_2 est alors la divergence du champ $U(M)$. On le calcule en faisant la somme des termes de la première diagonale du tenseur $\bar{\epsilon}$ de déformation, c'est le premier invariant de ce tenseur.

$$c) C_3 = \frac{\Delta S}{S}$$

Le défaut d'équerrage local du système d'axes sera exprimé par la variation relative de la surface latérale du cube élémentaire. Sur le plan mathématique, le coefficient C_3 est égal au premier invariant de $\bar{\epsilon}$ moins le double du second invariant.

$$C_3 = C_2 - 2(\epsilon_{11} \epsilon_{22} - \epsilon_{12} \epsilon_{21})$$

Sur le plan pratique dès qu'on a identifié le champ $U(M)$ l'application d'un simple jeu de formules mathématiques permet donc de calculer les 3 coefficients C_1, C_2, C_3 . Ces 3 coefficients caractérisent d'une manière intrinsèque les différents défauts de la machine en un point.

Il est alors facile de classer les machines en fixant des bornes supérieures à ces coefficients pour un type de machine donné.

Le procédé de repérage de la position dans l'espace d'un organe mobile de machine, que nous venons de décrire, s'applique à n'importe quel appareil dans lequel la position dans l'espace est associée à des coordonnées rapportées à un repère physique solidaire de la machine. (Machine-outil, robot, machine à mesurer, scanner, scintigraphie, radar, sonar, appareil de photogrammétrie.

VERIFICATION EXPERIMENTALE.

Les équations de départ sont :

$$\overline{N_R} \cdot \overline{A_R} \overline{M_R} + \overline{N_R} \cdot \overline{U(M_R)} - \overline{U(A_R)} \cdot \overline{N_R} + (\text{grad} \overline{U(A_R)} \cdot \overline{N_R}) = 0$$

$$\overline{A_R} \overline{M_R} = 0 \quad (2)$$

Ce qui correspond pour un point de palpé M_R sur un plan défini par le point A_R et la normale $\overline{N_R}$ à écrire que le défaut de planéité est égal à zéro.

Si l'on prend comme expression théorique du champ

$$\begin{aligned} \overline{U(M)} = & A + B \cdot x + Cy + D \cdot z + Ex^2 + Fy^2 + Gz^2 \\ & + Hxy + Ixy + Jyz + Kx^3 + Ly^3 + Mz^3 \\ & + Nx^2y + Ox^2z + Py^2x + Qy^2z \\ & + Rz^2x + Sz^2y \end{aligned}$$

et des expressions semblables du 3ème degré pour $U_y(M)$ et $U_z(M)$, on obtient un système à 57 inconnues. Il faut donc écrire un système de 57 équations. Théoriquement il suffit de palper 57 points puisqu'à chaque point de palpé correspond l'équation (2). En fait pour augmenter la précision des calculs on palpe un nombre de points très supérieur et l'on applique la méthode des moindres carrés.

On forme ainsi un système de 57 équations linéaires à 57 inconnues dont le déterminant n'est pas nul si l'on a choisi judicieusement les plans de palpée.

$$\text{Soit } \bar{A}X = \bar{B}$$

$$\text{Théoriquement } \bar{X} = \bar{A}^{-1} \cdot \bar{B}$$

Mais l'inversion de la matrice A pose des problèmes extrêmement délicats sur les ordinateurs dont nous disposons (UNIVAC 1110). (16 chiffres significatifs en double précision) ..

En fait toute la difficulté expérimentale est reportée sur ce calcul. On sait que le nombre de chiffres significatifs exacts "s" que l'on peut attendre de l'inversion d'une matrice de conditionnement

$$K = \|A\| \cdot \|A^{-1}\| \text{ est égal au mieux à :}$$

$$s > p - \log K$$

avec p = nombre de chiffres significatifs de l'ordinateur.

$$\text{Or ici } p = 16 \quad K = 45.10^9 \quad \log K = 24,5$$

donc s est négatif ! Le résultat est sans signification.

Nous avons alors été amené à écrire sur UNIVAC un programme de calcul "MULTIPRECISION" qui permet de faire les 4 opérations sur un nombre de chiffres significatifs fixés à l'avance (50 par exemple). Le temps d'inversion d'une matrice 57 x 57 sur 50 chiffres devient alors prohibitif. Il est alors nécessaire de rechercher un compromis entre précision et temps de calcul (donc prix !).

A titre d'exemples pour 20 chiffres significatifs une multiplication demande 7,88 millisecondes et une division 453 millisecondes, mais pour 48 chiffres significatifs il faut respectivement 44,4 ms et 4080 ms pour les mêmes opérations.

Nous avons donc été amené -faute de moyens- à expérimenter cette méthode avec un développement du 1er degré (ce qui conduit à une matrice 12 x 12) et 12 chiffres significatifs, ce qui limite sévèrement la portée de la vérification expérimentale.

Remarquons tout d'abord qu'un champ du 1er degré correspond à une translation, une rotation et un défaut d'équerrage des nouveaux axes de référence par rapport aux anciens. Pour procéder à l'identification de ce champ nous avons procédé au palpée systématique d'un marbre de dimensions 400 x 300.

Pour l'identification du champ les dimensions ne jouent aucun rôle puisque on définit la position du nouveau repère par rapport à l'ancien en plaçant le marbre en 6 positions différentes (repérage isostatique : 6 normales de repérages) puis à partir de la 7ème position on introduit le champ de déformation pour le point de référence du marbre.

Nous verrons par contre que pour la vérification il n'en n'est pas de même. Sur une machine à mesurer volontairement mal réglée nous avons obtenu le champ suivant :

$$Ux = 0,0075 + 0,0000675929 \cdot X + 0,0000191872 \cdot Y - 0,0000427563 \cdot Z$$

$$Uy = 0,00267 + 0,000030280 \cdot X + 0,00004965 \cdot Y + 0,000055808 \cdot Z$$

$$Uz = -0,00693 + 0,000179207 \cdot X - 0,0000246403 \cdot Y$$

$$+ 0,0000763879 \cdot Z$$

Typiquement nous voyons sur la figure (1) que le nouveau système d'axes revient "à remplacer" l'axe X par l'axe X'. En réalité la nouvelle position X', Y', Z' n'est pas vraiment représentable sauf sur un dessin en perspective. Cependant la Figure (1) va nous être utile pour analyser les résultats expérimentaux.

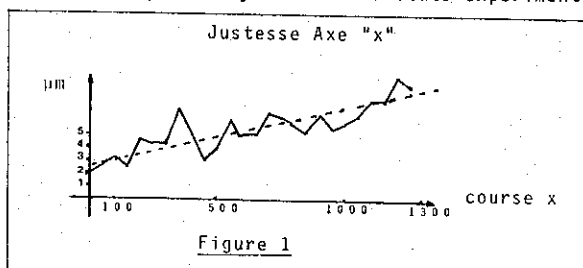


Figure 1

Pour vérifier la validité du champ nous avons re-mesuré le défaut de planéité du marbre en différentes positions en introduisant ou en supprimant à chaque fois le champ U(M). Les résultats obtenus sont inégaux.

Par exemple dans certains cas le défaut de forme du marbre passait de 2µ sans correction à 4µ avec correction, par contre dans d'autres cas il passait de 3µ sans correction à 2µ avec correction. Les raisons essentielles de ceci sont :

a) Le fait qu'un développement au 1er degré ne peut évidemment rendre compte de tous les défauts d'une machine. D'où nécessité de prendre un développement d'ordre plus élevé avec des calculs sur ordinateurs avec 25 chiffres significatifs au moins.

b) Du fait qu'on utilise un marbre de petites dimensions les défauts locaux l'emportent sur le défaut d'orientation du repère dont l'influence ne peut se faire sentir que sur une course d'au moins 1000 mm.

Ceci est très net sur la Figure (1) où pour une course de 100 mm (entre 400 et 500) on peut avoir un défaut de 5µ alors que pour la course totale (1300 mm) la correction est de 8µ. D'où nécessité de refaire une expérimentation avec une règle d'au moins 1000 mm pour que le résultat soit probant.

Avec le champ U(M) précédent on obtient le tenseur de déformation :

$$\bar{D} = 10^{-5} \begin{vmatrix} +6,75929 & 1,91872 & -4,27563 \\ +0,30280 & 0,49650 & +0,55808 \\ +1,79200 & -2,46403 & +7,63879 \end{vmatrix}$$

ainsi que les 3 coefficients C1, C2, C3 qui à notre avis caractérisent la machine :

$$C1 = -24 \cdot 10^{-5}$$

$$C2 = 1,49 \cdot 10^{-4}$$

$$C3 = 2,2 \cdot 10^{-8}$$

En conclusion nous pouvons dire que si les résultats expérimentaux ne sont pas absolument probants actuellement ils sont très encourageants étant donné la complexité du problème.

Nous poursuivons nos efforts pour obtenir un système opérationnel sur le plan industriel dans deux directions principales :

- Augmentation de la précision des calculs par l'utilisation du programme MULTIPRECISION (5)
- Augmentation de la précision des mesures par l'utilisation d'un marbre de grandes dimensions.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Werkstattstechnik - Zeitschrift für industrielle Fertigung. Vol. 67 N°5. Mai 1977.
Komparatorfehler bei Mehrkoordinatenmeßgeräten.
par M. Dietzsch und M. Lang.
- (2) Brevet d'invention N°79-30498 PARIS le 12-12-79
par A. Clément.
- (3) The accuracy of Machine Tool under load conditions. R. Schultschik.
Annals of C.I.R.P. 1979 p. 339.
- (4) Controlling a complex surface with a 3 D-measuring machine.
P. Bourdet - A. Clément. Annals of C.I.R.P. 1976
- (5) Programme MULTIPRECISION sur UNIVAC 1110 par
G. de Coligny. (Non publié)