

MISE EN EVIDENCE DES INCERTITUDES DE MESURE DANS LA VERIFICATION DES TOLERANCES GEOMETRIQUES

H. GHERIBI¹, S. BOUKEBBAB¹, I. AMARA¹, J.M. LINARES²

¹Laboratoire Ingénierie des Transports et Environnement, Faculté des Sciences de l'Ingénieur - Université de Mentouri Constantine Algérie

²Laboratoire ISM UMR6233, Aix-Marseille Université, IUT Aix en Provence France

Reçu le 12/07/2009 – Accepté le 18/09/2012

Résumé

Dans le cadre de la vérification des pièces manufacturées sur une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), le point de contact réel entre le palpeur et la surface mesurée étant inconnu, on lui substitue un point de contact estimé ou point mesuré.

Ce dernier est calculé à partir des coordonnées du point saisi (centre du palpeur), du sens d'accostage et du rayon du palpeur. Ce qui engendre un doute sur la position réelle du point palpé. Ce doute se propage même sur les paramètres des surfaces associées, ainsi que sur la construction géométrique nécessaire à la vérification des spécifications techniques.

C'est dans ce cadre que se place le présent travail qui consiste à la mise en évidence des incertitudes de mesure dans la vérification des spécifications techniques.

Mots clés : Machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), GPS, surfaces associées, optimisation, incertitudes de mesure.

Abstract

As part of the verification of manufactured parts on a coordinate measuring machine (CMM), the actual contact between the probe and the measured surface is unknown, it is substituted by an estimated or measured contact point.

The point is calculated from the taken point coordinates (center of the probe), the approach direction and the radius of the probe. This creates a doubt about the actual position of the point being felt. This doubt is spreading even on the parameters of the associated surface, as well as the geometric construction for the technical verification specifications.

It is in this context, this work is placed, which consist to do the demonstration of measurement uncertainties in the technical verification.

Keywords : Coordinate measuring machine (CMM), GPS, associated surface, optimization, measurement uncertainties.

ملخص

في إطار مراقبة القطع الميكانيكية المنتجة باستعمال آلة القياس ثلاثية الأبعاد، النقطة الحقيقية بين أداة القياس والسطح المقاس يكون مجهولا و لهذا الغرض يتم تعويضه بنقطة افتراضية تحسب بين أداة القياس و النقطة المأخوذة من طرف الآلة ثلاثية الأبعاد. هاته الأخيرة تحسب بواسطة إحداثيات مركز أداة القياس ، اتجاه القياس و قطر الأداة. هذا ما يؤدي إلى ارتياب في الموقع الحقيقي للنقطة المقاسة. هذا الارتياب يمتد إلى القيم الرياضية للأسطح المشابهة وكذلك في البناء الهندسي للقطع الميكانيكية عندما يتعلق الأمر بمراقبة المواصفات التقنية للقطع الميكانيكية المنجزة. ففي هذا الصدد يدخل هذا البحث والذي يهتم بوضع صورة واضحة لوجود الإرتيابات في القياسات والتي يجب أخذها بعين الاعتبار في المراقبة التقنية للقطع الميكانيكية.

الكلمات المفتاحية: آلة القياس ثلاثية الأبعاد ، الأسطح المثالية ، الإرتيابات في القياس ، القطع الميكانيكية

La géométrie des pièces mécaniques manufacturées est toujours imparfaite. Cette affirmation qui devrait être une évidence pour un ingénieur débutant ou expérimenté a été quelque peu oubliée. En effet, le progrès technique, avec l'apparition de moyens modernes et précis de définition d'une géométrie nominale, par la CAO (Conception Assistée par Ordinateur), et de réalisation, avec les MOCN (Machines Outils à Commande Numérique), donne l'illusion d'une géométrie parfaite. Ce qui nous ramène à se poser la question suivante : est-il vraiment nécessaire de perdre du temps pour l'inscription des spécifications techniques [1].

La métrologie sur machine à mesurer tridimensionnelle (figure 1) s'oriente vers l'objectif de mesurer, vérifier et comparer la surface réelle à sa définition théorique pour s'assurer que ces limites tolérables ont été bien respectées lors de la phase de production.

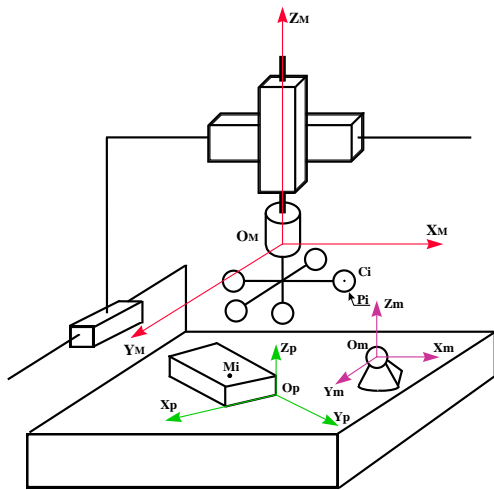


Figure 1 : Machine à mesurer tridimensionnelle

Lors d'un contrôle d'une pièce sur une machine à mesurer tridimensionnelle (figure 2), les surfaces doivent être mesurées par un nombre de points supérieur aux paramètres servant à la définition mathématique de l'élément géométrique. Dans ce cas, l'association de l'élément théorique aux points mesurés nécessite la connaissance des paramètres qui le définissent par rapport au nuage de points, dans lequel le défaut devient minimal.

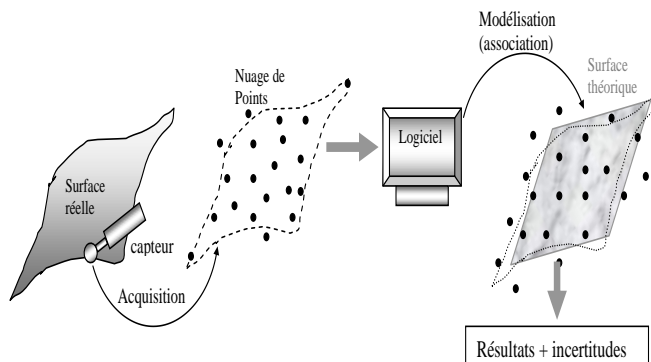


Figure 2 : Principe de la mesure tridimensionnelle

Dans ce cas l'élément géométrique peut être caractérisé par :

- ces paramètres intrinsèques à savoir : diamètre, axe d'un cylindre, étendu, angle d'un cône, ...etc;
- ces paramètres topologiques à savoir : position et orientation de l'élément dans l'espace ;

L'ensemble de ces paramètres offre la possibilité à l'élément géométrique de s'adapter au mieux au nuage de points mesurés.

Pour cela, trois modélisations du réel sont classiquement utilisées [2] :

- 1^{ère} modélisation : par un nombre infini de points. Cette modélisation appelée « *Skin modèle* » ou encore « *modèle de la peau de la pièce* » désigne de la façon la plus générale possible la surface réelle de la pièce.
- 2^{ème} modélisation : par un nombre fini de points. Ces points sont définis dans un repère par des coordonnées obtenues un capteur avec une incertitude sur chaque point. les points peuvent être regroupés par "paquets" correspondant aux différentes formes élémentaires de la pièce.
- 3^{ème} modélisation : les "paquets de points" sont lissés des modèle géométriques théoriquement exactes, le réel représentés par un ensemble de surfaces de substitution (surface idéales limitées par des contours)

Par ailleurs, le réel peut être identifié par des écarts entre un représentant de ce dernier (nuage de points, surface de substitution) et la géométrie nominale correspondante.

La représentation d'un même élément peut être très différente suivant les moyens matériels et le protocole utilisés pendant l'opération de mesurage ou de contrôle. Cette représentation aussi précise soit-elle ne donnera jamais le reflet exact de l'élément réel mais donnera une certaine image proche de l'image réelle (figure 3).

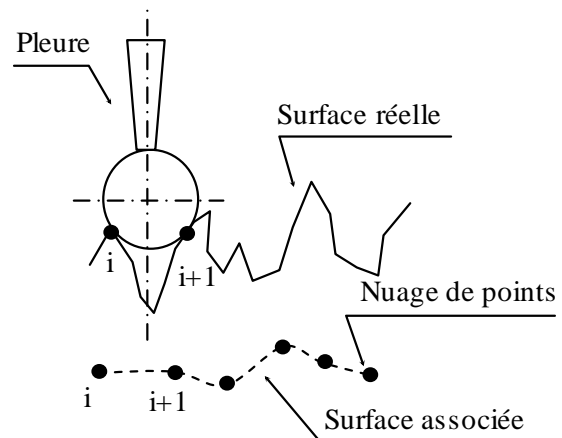


Figure 3 : L'image d'une surface réelle

Comme on peut le voir clairement sur la figure 2, le point de contact réel entre le palpeur et la surface mesurée étant inconnu, on lui substitue un point de contact estimé ou

point mesuré. Ce dernier est calculé à partir des coordonnées du point saisi (centre du palpeur), du sens d'accostage et du rayon du palpeur.

Pour cela on fait l'hypothèse que le point de contact recherché est l'intersection de la sphère du stylet et de la normale à la surface passant par le point saisi. Ce qui engendre une incertitude sur la position réelle du point palpé. Cette incertitude se propage même sur les paramètres des surfaces à contrôler.

La démarche qualité fixée par la norme ISO9000, impose au métrologue d'estimer l'incertitude avec laquelle, il a obtenu sa mesure. Cette incertitude ne peut être obtenue avec la méthode des petits déplacements (programmation linéaire) implémentée dans les logiciels de métrologie qui équipe les MMTs [3].

En non-linéaire, aucune approximation n'est réalisée, ce qui implique une meilleure estimation des incertitudes de mesure comparativement à la méthode de petits déplacements.

Par le présent travail nous allons dans un premier temps mettre en évidence la notion d'incertitude de mesure, et dans un deuxième temps nous allons faire ressortir l'impact de cette dernière sur la vérification des spécifications géométriques.

1. L'INCERTITUDE DE MESURE

Le concept d'incertitudes est relativement nouveau dans l'histoire de la mesure. L'évaluation convenable de l'incertitude requiert la poursuite d'une démarche à la fois analytique et expérimentale englobant une approche statistique de la mesure [4].

Le calcul des incertitudes associées à une caractéristique géométrique est aujourd'hui une préoccupation majeure du groupe de travail ISO/TC 213. Le GUM (guide pour l'expression de l'incertitude de mesure) constitue, notamment, la référence normative obligatoire dans ce domaine.

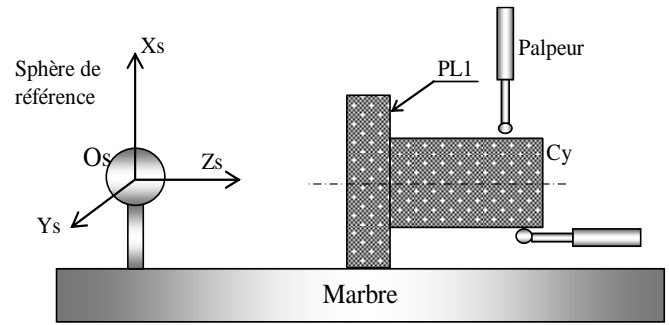
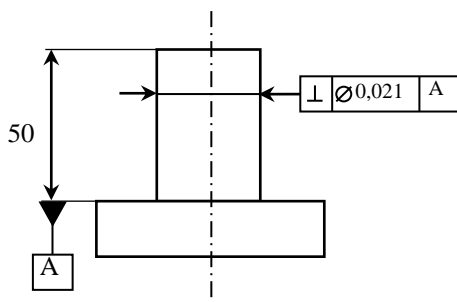


Figure-4 : Gamme de mesurage

L'objectif de ce guide est de présenter différentes approches pratiques pour l'estimation des incertitudes de mesure, et nous conduit à considérer que tout résultat de mesure est une variable aléatoire que l'on caractérise grâce à deux paramètres : la valeur annoncée qui est l'estimateur de l'espérance mathématique de la variable aléatoire « résultat de mesure » et l'incertitude -type qui est l'estimateur de l'écart-type de la variable « résultat de mesure ».

La démarche entreprise par le présent projet pour le calcul des incertitudes de mesure est basée sur la formulation matricielle suivante :

$$[A] \cdot [A]^t \{U_c(a_i)\} = [A]^t [B]$$

$$\{U_c(a_i)\} = ([A][A]^t)^{-1} [A]^t \cdot [B]$$

Cette dernière, est appliquée pour estimer les erreurs attachées aux résultats obtenus, ou plus précisément la stabilité du système d'équation [5] [6].

2. APPLICATION NUMERIQUE : CAS DE VERIFICATION D'UNE CONDITION DE PERPENDICULARITE

Nous prenons comme exemple la pièce présentée sur la figure 4, où nous allons nous intéresser à la condition de perpendicularité du cylindre diamètre $\varnothing 20$ h7 par rapport au plan A servant de surface de référence. Nous utilisons une machine à mesurer tridimensionnelle Trimesure 1005E équipée de la dernière version du logiciel de Métrosotf.

Compte tenu des possibilités de calcul du logiciel, on construit un repère pièce comme le montre la figure 6 :

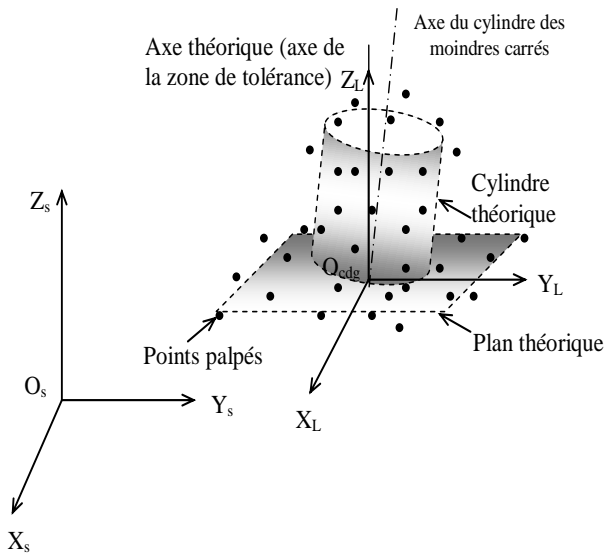


Figure-6 : Configuration obtenue par MMT

A partir de cet instant, nous injectons l'ensemble des relevés topographiques dans la maquette informatique développée, et qui servira d'une part à la détermination des paramètres des surfaces associées et à l'estimation des incertitudes (Uc(ai)).

Les tableaux suivants affichent les résultats obtenus :

Paramètres de la surface plane (mm)		
Vn (PL) (vecteur normal au plan)	Cdg (centre de gravité)	Défaut de forme -2.6921E-03
$n_x = 2.02204E-02$	$X_{cdg} = 380.94934$	
$n_y = 5.2131E-04$	$Y_{cdg} = 212.03579$	
$n_z = 0.999795$	$Z_{cdg} = -166.337033$	
Uc(Vn)	Uc(cdg)	
$U_C = \pm 5.5104E-05$	$U_{CX_{cdg}} = \pm 1.5995E-017$	
$U_C = \pm 2.4343E-03$	$U_{CY_{cdg}} = \pm 4.1238E-019$	
$U_C = \pm 6.5709E-08$	$U_{CZ_{cdg}} = \pm 7.9088E-016$	

Paramètres de la surface cylindrique (mm)		
Vn (Cy) (vecteur normal au plan)	Cdg (centre de gravité)	Défaut de forme -5.0442E-03
$n_x = -2.21252E-04$	$X_{cdg} = 348.60651$	
$n_y = 3.812667E-06$	$Y_{cdg} = 182.30875$	
$n_z = 0.99999997$	$Z_{cdg} = -176.78106$	
Uc(Vn)	Uc(cdg)	Paramètre intrinsèque R= 19.9815
$U_C = \pm 3.6644E-02$	$U_{CX_{cdg}} = \pm 1.3866E-02$	
$U_C = \pm 6.1966E-04$	$U_{CY_{cdg}} = \pm 2.4871E-04$	
$U_C = \pm 5.3294E-02$	$U_{CZ_{cdg}} = \pm 4.4097E-02$	

Après avoir déterminé les paramètres des deux surfaces de substitutions nous allons les utiliser pour vérifier la condition de perpendicularité. Pour cela, une reconstruction géométrique de la pièce est nécessaire (figure 7) ; elle débute par la détermination de la zone d'intersection des deux surfaces optimisées (plane et cylindrique).

La signification ISO de la condition de perpendicularité se résume dans la figure-10 [7].

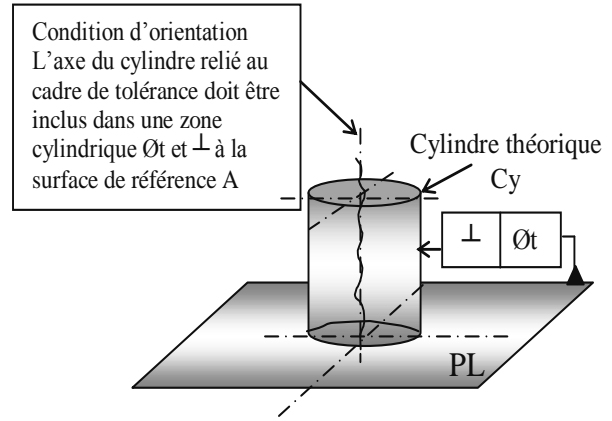


Figure 7 : Construction géométrique (ISO)

Ce qui implique que l'axe du diamètre $\varnothing 20\ h7$ doit être compris dans un tube de diamètre égal à $0,021$ [mm]. Pour que la condition de perpendicularité soit respectée il faut que : $\varnothing t \leq 0.021$. Du fait que la surface cylindrique optimisée dépend des deux paramètres u et v variés en fonction des deux rotations α, β respectivement autour des deux axes X_L, Y_L (figure 8),

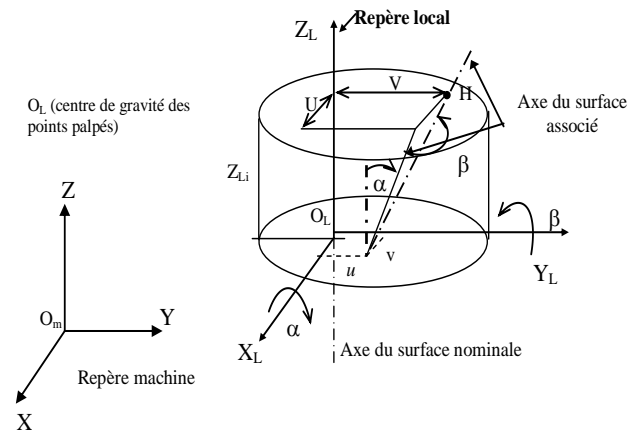


Figure 8 : Vérification de la perpendicularité (ISO)

On peut donc obtenir cette variation par la relation vectorielle suivante [8] :

$$d\vec{H} = \vec{D}_0 + H\vec{O}_L \wedge \vec{\Omega} = \begin{vmatrix} u & 0 & \alpha \\ v & 0 & \beta \\ 0 & -Z_{Li} & 0 \end{vmatrix}$$

$$D'ou : d\vec{H} = \begin{Bmatrix} U \\ V \\ W \end{Bmatrix} = \begin{vmatrix} u + Z_{Li} \beta \\ v - Z_{Li} \alpha \\ 0 \end{vmatrix}, \text{ avec } Z_{Li} = L$$

(L : la longueur du cylindre)

$$\Delta t = \sqrt{(u_{opt} + L \cdot \beta_{opt})^2 + (v_{opt} - L \cdot \alpha_{opt})^2} \leq 0.021$$

Pour calculer l'incertitude sur la condition géométrique imposée sur le dessin de définition de la pièce étudiée, on utilise la formulation de la propagation des incertitudes sur un scalaire (figure 9).

$$U_C^2(\Phi t) = \sum U_C^2(x_i)$$

D'où : $U_C(\Phi t) = \sqrt{\sum U_C^2(x_i)}$

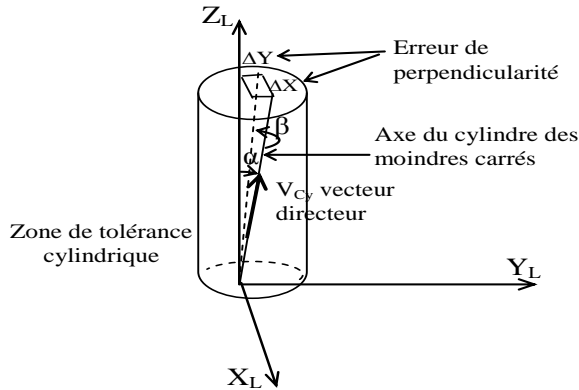


Figure 9 : Calcul des incertitudes

Les coordonnées du point d'intersection			La valeur de la perpendicularité
X _{int}	Y _{int}	Z _{int}	Δt=1.10642E-02
375.5654	211.9666	-166.337	L'incertitude sur la valeur de la perpendicularité
			ΔΔt=±7.3266E-04

On remarque que la valeur de perpendicularité calculée est inférieure à la zone de tolérance ce qui implique que la pièce est conforme

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans le cas du plan on peut remarquer aisément que les incertitudes sur la position du barycentre sont largement faibles (nulles) que celle du vecteur normal. Elles bénéficient de l'effet atténuateur de l'étendue de la surface. On remarque également, que l'incertitude sur la composante de ce vecteur suivant l'axe X est faible par rapport à l'axe Y. , cela peut être due à la distribution des points mesurés c'est-à-dire, que ces points sont plus étendus suivant l'axe X que l'axe Y.

Dans le cas du cylindre on observe que les incertitudes sur la position du barycentre sont peu faibles par rapport à celles du vecteur directeur, et aussi le doute est faible sur la composante du vecteur suivant Y par rapport à X, car les points palpés sont plus étendus suivant l'axe Y que l'axe X.

CONCLUSION

Pour conclure la maquette informatique réalisée permet de déterminer l'ensemble des paramètres caractérisant les surfaces à mesurer, et de calculer l'incertitude associée à ces paramètres [9].

La démarche de qualité fixée par la norme ISO9000, impose au métrologue d'estimer l'incertitude avec laquelle, il a obtenu sa mesure. L'automatisation du calcul des incertitudes permet d'envisager l'utilisation de la méthodologie de la recherche expérimentale (plans d'expériences) afin de mettre en évidence les facteurs les plus influents. Ils nous permettront de donner les précautions à prendre afin de diminuer les incertitudes sur les résultats. De même, des indications sur la réalisation des gammes de mesures pourront être fournies aux utilisateurs avant que les logiciels de métrologie incluent les fonctionnalités présentées dans ce document.

REFERENCES

- [1] R. Sellakh , E. Sellem, A. Riviere « Spécification et simulation des imperfections géométriques en CFAO », Mécanique et Industrie (2000), vol 1, pp 365–372
- [2] Pierre BOURDET «Spécification géométrique des pièces mécaniques » *L'Ecole Normale Supérieure de Cachan*, PARIS, février 2001.
- [3] J.M. LINARES, J. BACHMANN, J.M. SPRAUEL « Détermination des incertitudes des surfaces associées» *Mécanique & Industries* 3 (2002) 261–266, ELSEVIER.
- [4] Max Feinberg, Douglas Rutledge et Marie Lafargue « L'importance scientifique et économique de la métrologie en recherche et contrôle » UMR INRA/INA PG Ingénierie Analytique pour la Qualité des Aliments 16 rue Claude Bernard. 75231 Paris Cedex 05. 9-10 avril 2002
- [5] S.D. NIGAM, J.D GUILFORD, J.U. TURNER, « Derivation of generalized datum frames for geometric tolerance analysis », ASME Design Automation Conference
- [6] S. Courtois, «Réalisation d'un logiciel de choix de plans d'expériences piloté par réseau de neurones, *Séminaire de CNRIUT'98, Mai 1998, p209-222, Fontainebleau, France*
- [7] Michel AUBLIN « Exploitation du concept G.P.S et de la normalisation pour la spécification géométriques des produits » cours nb. Pages 80, 15 janvier 1999
- [8] J.M. LINARES, « contribution à l'étude de la cotation fonctionnelle par une approche systémique » thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 1996.

[9] S. BOUKEBBAB, « Contribution à l'étude des discontinuités présentes dans les mécanismes en vue d'une ingénierie coopérative » Thèse de doctorat, Ecole

Nationale Supérieure des Arts et Métiers Aix-en-Provence, Année 1998.