



Modélisation géométrique des machines-outils 5 axes pour la compensation de l'exactitude volumétrique

Fabien Viprey, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier, Hichem Nourra

► To cite this version:

Fabien Viprey, Sylvain Lavernhe, Christophe Tournier, Hichem Nourra. Modélisation géométrique des machines-outils 5 axes pour la compensation de l'exactitude volumétrique. 14eme colloque national AIP Primeca, Mar 2015, La Plagne, France. hal-01122509

HAL Id: hal-01122509

<https://hal.science/hal-01122509>

Submitted on 4 Mar 2015

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.

Modélisation géométrique des machines-outils 5 axes pour la compensation de l'exactitude volumétrique

Fabien Viprey

Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE)
1, rue Gaston Boissier
75015 Paris Cedex 15 – France
fabien.viprey@lne.fr

Sylvain Lavernhe

LURPA, ENS Cachan, Univ Paris-Sud
F-94235 Cachan, France
sylvain.lavernhe@lurpa.ens-cachan.fr

Christophe Tournier

LURPA, ENS Cachan, Univ Paris-Sud
F-94235 Cachan, France
christophe.tournier@lurpa.ens-cachan.fr

Hichem Nouira

Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE)
1, rue Gaston Boissier
75015 Paris Cedex 15 – France
hichem.nouira@lne.fr

Résumé :

Afin d'améliorer les procédés de fabrication et notamment les procédés par enlèvement de matière, il est essentiel d'optimiser les écarts géométriques intrinsèques au moyen de fabrication. Malgré la norme internationale ISO 230, un grand nombre de modèles géométriques sont développés dans la littérature. Ce papier propose une démarche de modélisation des erreurs géométriques de machines basée sur leur définition normalisée. L'objectif terminal est de trouver l'ensemble minimal des erreurs définies dans le modèle permettant de caractériser au mieux l'exactitude volumétrique mesurée dans l'espace de travail. La mesure est quant à elle réalisée par palpée d'une sphère de référence à l'aide d'un palpeur mécanique intégré au centre d'usinage.

Mots-clés : Machine-outil, exactitude volumétrique, modèle géométrique, mesurage indirect.

I. INTRODUCTION

Les machines-outils 5-axes sont des boucles structurelles multiaxes. Elles sont considérées à ce jour, comme des moyens de production courants et se déclinent dans un grand nombre d'architectures différentes [1, 2]. Dans ce papier, seules les boucles structurelles composées de trois axes de translation et deux axes de rotation sont considérées. La principale fonction de la boucle structurelle est de maintenir la position relative entre l'effecteur (c.-à-d. l'outil ou le système de mesure) et la pièce. Comme le montre la Figure 1, l'écart entre le positionnement effectif de l'outil par rapport à la pièce et le positionnement nominal est nommé exactitude volumétrique (V_{XYZ}) (ISO 230-1:2012 [3]). Cette exactitude volumétrique est principalement générée par l'existence d'erreurs géométriques au sein même de la boucle structurelle [4]. Afin d'améliorer le processus de fabrication, il est nécessaire de minimiser V_{XYZ} . Pour cela, la première étape consiste à effectuer une modélisation de ces erreurs géométriques sur la boucle structurelle. Il est ensuite nécessaire de venir identifier tout ou partie des paramètres mis en jeu. Enfin, basée sur la modélisation des écarts, la simulation des effets (i.e. V_{XYZ}) permet d'envisager une phase de compensation.

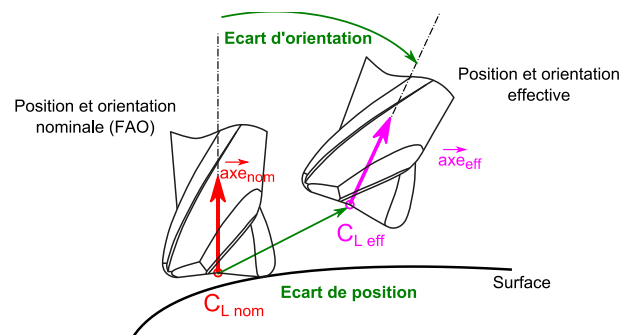


FIGURE 1: EXACTITUDE VOLUMETRIQUE

Dans la boucle structurelle, en faisant l'hypothèse de solides et de liaisons infiniment rigides, chaque axe est composé de deux solides qui constituent une liaison mécanique à un degré de liberté biaisé par six erreurs géométriques dites de mouvements. D'après l'ISO 230-1:2012 [3], dans le cas d'un axe de translation, les six erreurs de mouvement sont : une erreur de positionnement linéaire de mouvement, deux erreurs de rectitudes dans des directions orthogonales au mouvement, et trois erreurs angulaires de mouvement (appelées lacet, roulis, tangage dans le cas d'axes horizontaux). D'après l'ISO 230-7:2007 [5], les six erreurs de mouvements d'un axe de rotation sont : une erreur de positionnement angulaire de mouvement, deux erreurs de mouvement d'inclinaison, deux erreurs de mouvement radial dans deux directions orthogonales à la direction de mouvement, et une erreur de mouvement axial.

La boucle structurelle est constituée d'un ensemble d'axes eux-mêmes constitués de composants (c.-à-d. solides). Par ailleurs, la fabrication et l'assemblage de ces composants génèrent des erreurs géométriques dites de position et d'orientation d'axe. Ces erreurs indépendantes des mouvements d'axe provoquent des écarts entre la direction nominale et la direction effective des axes ; autrement dit des écarts sur les directions de mouvement de la structure. L'ISO 230 définit le nombre suffisant de ces erreurs de position et

d'orientation dans le cas de ligne droite de référence ou de ligne moyenne d'axe, respectivement pour les axes de translation ou de rotation. Ces erreurs de position et d'orientation sont au nombre de deux pour un axe de translation (p. ex. E_{A0Z} et E_{B0Z} sur la Figure 2) et de quatre dans le cas d'un axe de rotation (p. ex. E_{X0C} , E_{Y0C} et E_{A0C} , E_{B0C} sur la Figure 2). De plus, une erreur de position de zéro est définie par axe (c.-à-d. E_{Z0Z} et E_{C0C} sur la Figure 2).

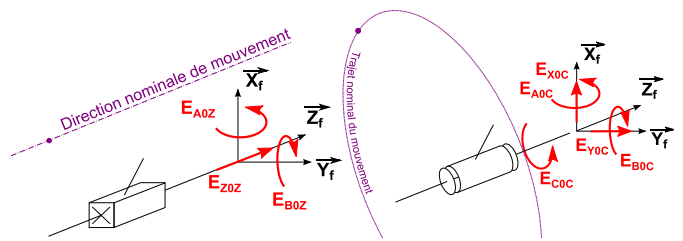


FIGURE 2. ERREUR DE POSITION ET D'ORIENTATION D'AXE DE TRANSLATION Z ET D'AXE DE ROTATION C.

Type d'axe	Erreurs de mouvement	Erreurs de position de zéro	Erreurs de position et d'orientation	Nombre d'axes	Total
Translation	6	1	2	3	27
Rotation	6	1	4	2	22
					49

TABLEAU 1.ERREURS GEOMETRIQUES POUR UNE STRUCTURE 5-AXES ([3] [5])

En résumé, d'après le Tableau 1, le nombre total d'erreurs géométriques pour une structure 5 axes est de quarante-neuf. Ces erreurs ne sont pas toutes nécessaires à la caractérisation de l'exactitude volumétrique. Hormis les trente erreurs de mouvement, l'ISO 230 [3, 5] propose une réduction du modèle à huit erreurs de position et d'orientation nécessaires parmi les dix-neuf restantes, pour caractériser entièrement une machine-outil cinq axes. Malgré une définition normalisée des erreurs géométriques, des modèles comportant un nombre d'erreurs différentes sont utilisés dans la littérature, pour décrire l'exactitude volumétrique inhérente d'une structure.

Abbaszadeh-Mir [6], développe un modèle géométrique avec prise en compte des erreurs de position et d'orientation d'axes et six erreurs de défauts de montage de l'outil et six relatifs au montage de la pièce. La réduction du nombre d'erreurs s'appuie sur une étude du rang de la matrice liant l'écart volumétrique aux erreurs. L'identification est menée à l'aide d'un ball-bar télescopique et magnétique.

Yu [7], définit un modèle de grande efficacité en temps de calcul. Le modèle est réduit à une combinaison de vingt erreurs linéairement indépendantes incluant des erreurs de mouvement, de position et d'orientation d'axes.

Bohez [8], adopte une stratégie de modélisation comportant neuf erreurs de position et d'orientation d'axe, déterminées par le nombre minimal de barres rigides nécessaires pour supprimer l'ensemble des degrés de liberté de la structure. Une réduction du modèle est menée par l'étude de l'indépendance linéaire des erreurs considérées. L'identification de ceux-ci se

fait par mesurage d'alésages usinés au préalable dans une pièce test.

Lei [9, 10] construit un modèle à soixante et une erreurs composées des trente erreurs de mouvement, treize erreurs de position et d'orientation d'axe, et dix-huit erreurs de montage comprenant ceux de la broche, de l'outil, et de la pièce. L'identification de cinquante-neuf erreurs est réalisée par palpé mécanique et par l'utilisation d'un interféromètre 5D.

Tsutsumi [11] mène une identification à l'aide d'un ball-bar télescopique et magnétique des huit erreurs de position et d'orientation des deux axes de rotation d'une structure cinq axes sur les treize erreurs modélisées au départ.

Le modèle proposé par Lin et Shen dans [12] est basé sur la prise en compte des erreurs de mouvement ainsi que sept erreurs d'orientation d'axe. Une approche par addition de matrices homogènes permet de simplifier les expressions tout en conservant le sens physique du modèle.

Ref	Erreurs de mouvement	Erreurs de position et d'orientation	Erreurs de montage	Erreurs indépendantes
[3, 5]	30	19	0	38
[6]	0	30	12	20
[7]	30	30	0	20
[8]	30	9	0	32
[9, 10]	30	19	12	59
[11]	0	30	0	13
[12]	30	7	0	-

TABLEAU 2. COMPARAISON DE DIFFERENTS MODELES GEOMETRIQUES, DE L'INDEPENDANCE DE CEUX-CI.

D'après le Tableau 2, lorsque les erreurs de mouvement sont prises en compte, le nombre d'erreurs associées est identique (c.-à-d. trente erreurs soit six par axe), et cela quel que soit le modèle. En effet, les erreurs de mouvement dépendent des paramètres articulaires et ne peuvent pas être réduites. Ce qui n'est pas le cas des erreurs de position et d'orientation d'axe, dont la réduction est souvent peu justifiée. Ainsi le nombre d'erreurs indépendantes, c'est-à-dire celles qui ont un effet différent sur l'exactitude volumétrique, reste à clarifier.

La prise en compte de toutes les erreurs à effets indépendants sur l'exactitude volumétrique, au sein d'un modèle, permettrait la caractérisation fidèle de l'exactitude volumétrique. Ainsi, ce papier propose une démarche générique de modélisation conforme à la norme ISO 230, constitué d'un nombre minimal d'erreurs de position et d'orientation d'axe dont les effets sur l'exactitude volumétrique sont indépendants. Cette approche consiste à réduire ce modèle dans le but d'effectuer une compensation sur une machine cinq axes de type RRTTT. À cet effet, une analyse des combinaisons envisageables d'erreurs de position et d'orientation d'axes est menée. Parmi ces combinaisons, on retiendra celle qui minimise l'exactitude volumétrique mesurée dans l'espace de travail. Cette mesure est effectuée par mesurage d'une sphère avec un palpeur machine. Si cette technique est utilisée dans l'industrie pour l'identification du

point pivot réel sur une machine 5 axes, nous proposons de l'étendre à l'identification de l'ensemble des erreurs modélisées.

Le papier est articulé de la manière suivante : la section 2 présente la modélisation géométrique d'un axe machine et son utilisation pour modéliser l'ensemble d'une structure ; la section 3 traite de la simulation de l'exactitude volumétrique par machines virtuelles pour la réduction et l'identification des erreurs du modèle ; la section 4 quant à elle est consacrée à l'application sur machine-outil 5-axes réelle. Cette partie présente une stratégie de mesure de l'exactitude volumétrique ainsi que les résultats d'identification des erreurs.

II. MODELE GEOMETRIQUE

Cette étude se place dans un cadre quasi-statique dans lequel les liaisons et les solides sont considérés comme infiniment rigides. Chaque degré de liberté entre deux solides consécutifs S_i et S_{i+1} , respectivement associés aux repères R_i et R_{i+1} , constitue un axe. Un nombre suffisant d'erreurs géométriques normalisées est introduit entre deux solides successifs. Ainsi il est possible de définir un modèle géométrique d'axe $i+1$ non idéal en utilisant un formalisme de matrice de transformation homogène. A cette étape de modélisation, il n'est pas fait de simplification au premier ordre : toutes les rotations y sont décrites et définies complètement. Le modèle géométrique non idéal d'axe $i+1$ est représenté à la Figure 3 et à l'éq. (1) avec :

- T_N définissant la géométrie nominale du solide S_i ;
- T_{EPO} caractérisant les erreurs de position et d'orientation d'axe : trois ou cinq paramètres normalisés en fonction du type de liaison (Cf. Figure 2) ;
- T_M décrivant le mouvement articulaire nominal q qui correspond au degré de liberté de la liaison ;
- T_{EM} caractérisant les six erreurs de mouvement (p. ex. dans le cas d'une glissière horizontale : une erreur de positionnement linéaire, deux rectitudes, le lacet, le roulis et le tangage).

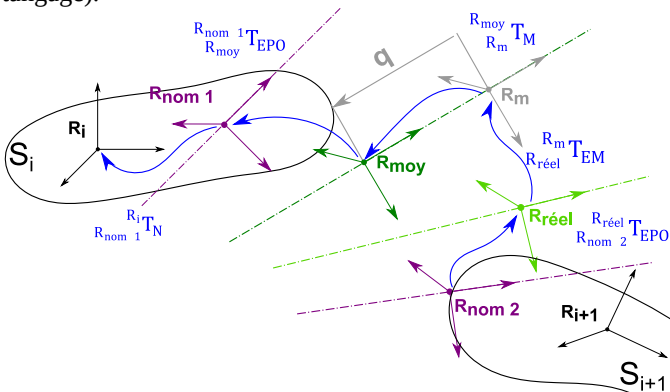


FIGURE 3. MODELE GEOMETRIQUE D'AXE $i+1$ NON IDEAL (CAS D'UN AXE DE TRANSLATION).

éq. (1) :

$${}^{R_{i+1}}T_{axe\ i+1} = {}^{R_i}T_N \cdot {}^{R_{nom\ 1}}T_{EPO} \cdot {}^{R_{moy}}T_M \cdot {}^{R_m}T_{EM} \cdot {}^{R_{réel}}T_{EPO}$$

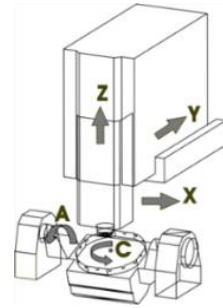


FIGURE 4. MACHINE-OUTIL CINQ AXES MIKRON UCP 710.

Ce modèle est étendu à chaque axe de la machine-outil cinq axes Mikron UCP 710 (Figure 4), auquel on introduit également six paramètres géométriques de montage de l'outil et six de montage de la pièce. Ainsi le modèle développé est constitué de soixante et une erreurs géométriques. Ces soixante et une erreurs se décomposent en trente erreurs de mouvement, dix-neuf erreurs de position et d'orientation d'axe et douze erreurs de montage.

III. SIMULATION POUR LA REDUCTION DE MODELE

L'objectif de cette partie est de présenter la méthodologie globale pour déterminer les valeurs du meilleur groupe de huit erreurs de position et d'orientation d'axe afin de représenter fidèlement, après identification, une exactitude volumétrique simulée.

A. Simulation basée sur les machines virtuelles

Le problème consiste à déterminer le meilleur groupe de huit erreurs de position et d'orientation d'axe parmi les dix-neuf. Pour y répondre, une procédure de réduction du modèle est proposée à l'aide de machines virtuelles.

Le fonctionnement d'une machine virtuelle repose sur une trajectoire, représentée sous la forme d'un vecteur d'excitation où figurent les valeurs articulaires, ainsi que sur un vecteur d'erreurs.

Pour un groupe d'erreurs E dont on se donne des valeurs réalistes, et pour un vecteur d'excitation u donné, la machine virtuelle permet de simuler l'exactitude volumétrique virtuelle de référence V_{XYZ}^{mv} (Figure 5). La procédure de réduction consiste à déterminer un groupe de huit erreurs $\hat{E}$ permettant de minimiser l'écart entre l'exactitude volumétrique résultante $\hat{V}_{XYZ}^{mv}$ et la référence (éq. (2)) :

éq. (2) :

$$e_{v_{xyz}}(\hat{E}, u) = \hat{V}_{XYZ}^{mv}(\hat{E}, u) - V_{XYZ}^{mv}(E, u)$$

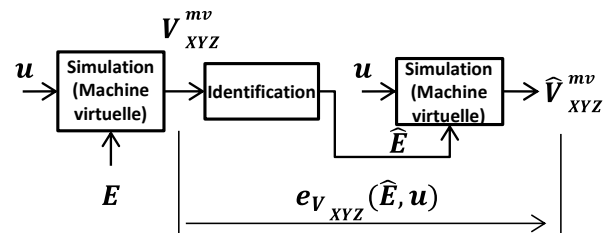


FIGURE 5: SIMULATION BASEE SUR LES MACHINES VIRTUELLES

Ensuite, un choix de huit erreurs parmi E , permet de procéder à l'identification des valeurs de ces huit erreurs, qui sont donc estimées et notées $\hat{E}$. A ce stade de l'étude, il est possible de cartographier une exactitude volumétrique identifiée $\hat{V}_{XYZ}^{mv}$ dans l'espace de travail à partir de ces erreurs identifiées $\hat{E}$.

B. Réduction du modèle et identification

L'identification des huit erreurs parmi les dix-neuf est menée en deux temps. Premièrement, une matrice de sensibilité S traduisant les effets au premier ordre de toutes les erreurs sur le positionnement de l'outil a été construite (erreurs de montage de l'outil et de la pièce comprises, soit vingt-cinq erreurs). Ces effets sont traduits pour l'ensemble des N configurations u . Ainsi S est une matrice de dimension n par vingt-cinq (eq. (3)).

eq. (3) :

$$S_{[n \times 25]} \times E_{[25 \times 1]} = V_{XYZ} [n \times 1]$$

La dimension n correspond aux N configurations particulières où est considérée :

1. soit l'exactitude volumétrique V_{XYZ} dans sa totalité : trois écarts d'orientation et trois de position. Ainsi $n = 6N$.
2. soit l'exactitude volumétrique V_{XYZ} en position (i.e. trois écarts de position). Ainsi $n = 3N$.

Une analyse des combinaisons des erreurs géométriques, couplée à une analyse du rang de la matrice de sensibilité S , permet de déterminer les erreurs solutions du problème de minimisation énoncé à l'eq. (4).

eq. (4) :

$$\hat{E} = \operatorname{argmin}_{\mathbb{R}^n} (\|S \times E - V_{XYZ}^{mv}\|_2)$$

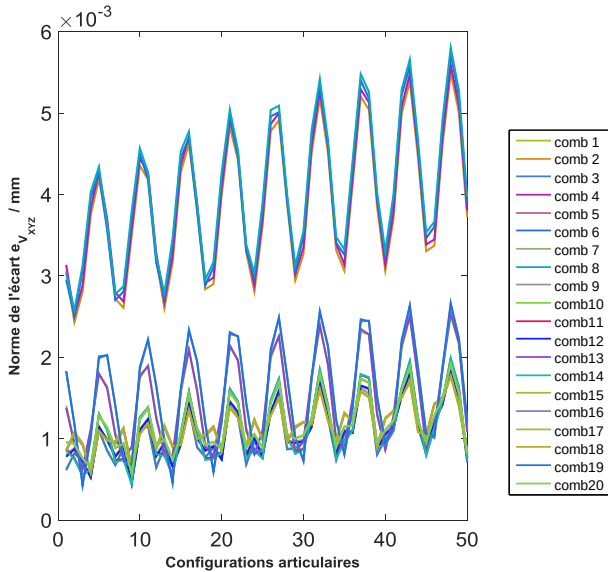


FIGURE 6: ÉCART DE CALCUL V_{XYZ} SUR MACHINE VIRTUELLE, POUR CHACUNE DES VINGT COMBINAISONS ET POUR UN VECTEUR DE PARAMÈTRE E FIXE.

Quel que soit le cas, prise en compte des écarts d'orientation ou non, seulement vingt combinaisons de paramètres géométriques sur $C_8^{19} = 78\,582$ potentielles permettent de résoudre le problème de minimisation énoncé à l'eq. (4). La combinaison exposée dans l'ISO 230 ainsi que dans [6] figurent parmi les vingt.

Les vingt combinaisons n'ont pas le même comportement sur la minimisation de l'écart entre l'exactitude volumétrique résultante $\hat{V}_{XYZ}^{mv}$ et la référence (eq. (2)).

En effet, pour un vecteur d'erreurs E fixé, la Figure 6 montre la différence de comportement des vingt combinaisons pour un vecteur d'excitation u donné. Pour ce vecteur E , trois familles de combinaisons de huit erreurs ont des effets similaires. Ceci s'explique par la prédominance de l'effet de certaines erreurs.

IV. APPLICATION AU CENTRE D'USINAGE MIKRON UCP 710 DU LURPA.

Le premier problème qui consistait à déterminer le meilleur groupe de huit erreurs de position et d'orientation d'axe parmi les dix-neuf a été traité par utilisation de machines virtuelles. Il a permis de déterminer le meilleur groupe de huit erreurs au regard d'un vecteur d'erreurs E fixé en entrée d'une machine virtuelle. Le vecteur E n'est pas représentatif des erreurs géométriques présentes sur la machine 5-axes du LURPA.

Ainsi, le second problème porte sur la démarche d'identification à mettre en place sur la machine réelle pour quantifier les huit erreurs de chaque groupe et d'envisager le choix du meilleur groupe. Cette identification ne pourra être menée qu'après mesurage de l'exactitude volumétrique V_{XYZ}^{mr} sur la machine réelle pour certaines configurations u .

A. Procédure de mesure de l'exactitude volumétrique V_{XYZ}^{mr}

Une procédure rapide tant sur le plan du réglage que sur le plan de la mesure a été choisie afin de minimiser le temps d'immobilisation de la machine. Afin d'éviter d'affecter la mesure par les traitements et compensations éventuelles non maîtrisées de la commande numérique, une mesure brute des paramètres articulaires a été effectuée. Cette procédure a nécessité l'intégration d'un palpeur 3D, ainsi que la capture des signaux bruts des codeurs de règles de mesure, et l'interfaçage temps réel pour la mesure externe à la commande numérique. La procédure de mesure comprend plusieurs tâches qui sont :

- La prise d'origine machine par comptage de marques de référence à distances codées ;
- La lecture temps réel (fréquence = 33kHz) des coordonnées machine (X, Y, Z, A, C) directement sur les codeurs Heidenhain ;
- La récupération du signal de l'état du stylet de palpeur 3D Renishaw ($U_{(k=2)} = 0,25\mu\text{m}$ à $V_f=240\text{mm/min}$) ;
- L'enregistrement synchronisé des coordonnées machine sur déclenchement de stylet ;
- La récupération des données enregistrées sur le calculateur temps réel dSpace.

Seules les composantes de position de l'exactitude volumétrique V_{XYZ}^{mr} sont mesurées grâce au palpé d'une

sphère de référence montée sur la table de la machine (Figure 7). Ainsi, la procédure de mesurage oriente la réduction et la procédure sur le cas n°2 décrit dans la partie III.B. L'exactitude volumétrique est déduite comme étant la différence entre la position réelle de la sphère et sa position nominale.



FIGURE 7: MESURE DE V_{XYZ}^{mr} PAR PALPAGE DE LA SPHERE.

Cinquante configurations articulaires différentes, correspondantes à u sont utilisées afin de maximiser les mouvements des cinq axes le long de leur course (Figure 8). Elles sont réparties linéairement le long de la course de l'axe A et de l'axe C et pour neuf tours de l'axe C (plateau de la machine), le tout en balayant au maximum les courses de X, Y et Z. La stratégie de mesure est directement issue de [13]. La sphère est palpée en 9 points, suivant 9 directions définies dans le repère machine. Plus précisément, les directions de palpage sont : $-\vec{X}$; $+\vec{Y}$; $+\vec{X}$; $-\vec{Y}$; $\vec{Y} + \vec{Z}$; $-\vec{X} + \vec{Z}$; $+\vec{Y} + \vec{Z}$; $+\vec{X} + \vec{Z}$ et $+\vec{Z}$.

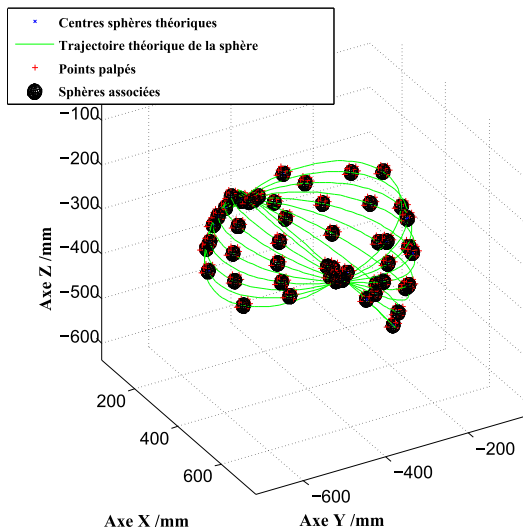


FIGURE 8: LOCALISATION DE LA SPHERE DE REFERENCE DANS L'ESPACE DE TRAVAIL.

La mesure de ces cinquante positions de sphère de référence permet de cartographier les composantes de position de l'exactitude volumétrique mesurée (Figure 9). L'impact des erreurs de position et d'orientation des axes de rotation est nettement visible sur la Figure 9. En effet, les oscillations, au nombre de neuf, correspondent au nombre de tours du plateau. La dérive constatée sur la norme de V_{XYZ}^{mr} est due aux paramètres géométriques de l'axe A. En effet, les valeurs de A croissent linéairement au fur et à mesure que les configurations articulaires évoluent, contrairement à X, Y, Z, et C.

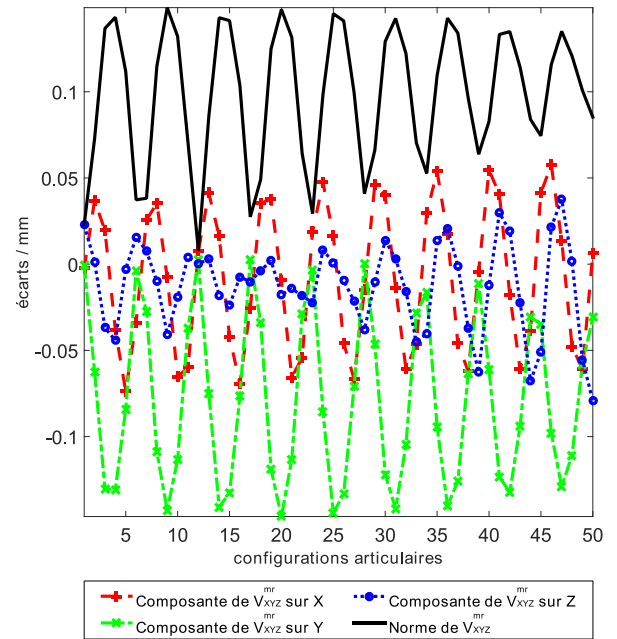


FIGURE 9: NORME ET COMPOSANTES DE POSITION DE L'EXACTITUDE VOLUMETRIQUE V_{XYZ}^{mr} POUR CHACUNE DES CINQUANTE CONFIGURATIONS.

B. Résultats

Après estimation des erreurs par le biais de la procédure expérimentale (Figure 10), le résidu d'estimation $r(\hat{E})$ peut être calculé (eq. (5)). Ce résidu est la différence entre l'exactitude volumétrique mesurée V_{XYZ}^{mr} sous l'excitation u (i.e. les cinquante configurations) et $\hat{V}_{XYZ}^{mv}$ simulée à partir de la machine virtuelle pour les erreurs estimées correspondantes $\hat{E}$.

eq. (5) :

$$r(\hat{E}) = V_{XYZ}^{mr}(u) - \hat{V}_{XYZ}^{mv}(\hat{E}, u)$$

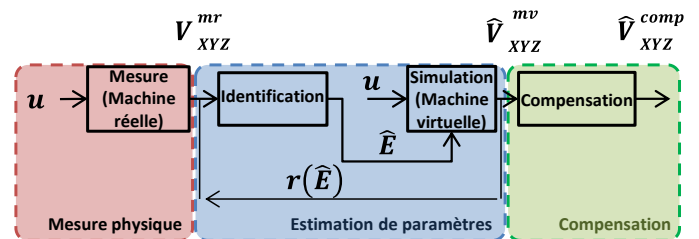


FIGURE 10 : PROCEDURE D'ESTIMATION DES ERREURS DE MODELE.

La Figure 11 montre que le résidu d'estimation $r(\hat{E})$ est identique pour les vingt combinaisons. Autrement dit, les combinaisons des erreurs estimées (identifiées) permettent de caractériser l'exactitude volumétrique de la même manière. Ce résidu persistant peut être dû à des effets non pris en compte tels que les erreurs de mouvements, les termes d'ordre deux ou supérieurs, l'incertitude de mesure, la thermique.

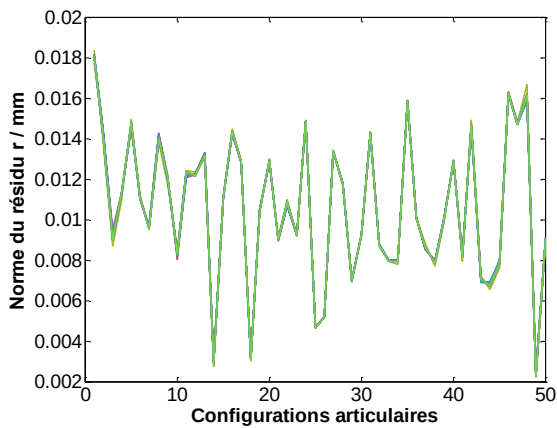


FIGURE 11: RESIDU $r(\hat{E})$ POUR LES VINGT COMBINAISONS.

Conclusion :

Dans ce papier, une modélisation d'une structure cinq axes a été développée conformément à l'ISO 230. Cette modélisation comporte toutes les erreurs géométriques normalisées pour caractériser la géométrie. Le caractère générique de la modélisation lui confère une grande souplesse et adaptabilité à tout type d'architecture sérielle, quelle que soit celle-ci (p. ex. un robot anthropomorphe, une machine à mesurer tridimensionnelle).

La détermination des erreurs de position et d'orientation d'axes nécessaires et suffisantes a été menée par analyse de combinaisons d'erreurs afin d'optimiser au mieux l'exactitude volumétrique mesurée. Les résultats de mesures ont servi à l'identification des vingt combinaisons d'erreurs par minimisation du résidu d'estimation. La compensation d'une combinaison parmi les vingt permettra de diminuer sensiblement l'exactitude volumétrique au sein du volume de travail de la machine. Une perspective à ces travaux est de finaliser l'identification des erreurs géométriques, mais aussi celles de mouvement. En vue d'améliorer le processus de fabrication. La dernière phase portera alors sur le choix de la méthode de compensation des erreurs géométriques $\hat{E}$ estimées, ainsi que des erreurs de mouvement.

Remerciements :

Ces travaux s'inscrivent dans le projet européen IND62: JRP-TIM : Traceable In-process dimensional Measurement. Les auteurs remercient sincèrement l'organisation European Metrology Research Programme (EMRP) qui est financé par les pays membres de EURAMET et de l'Union européenne.

Ces travaux ont été menés au sein du groupe de travail « Manufacturing 21 », regroupant 18 laboratoires de recherche français où les thèmes abordés sont :

- *Modélisation des interactions outil/matière*
- *Comportement mécanique des structures articulées*
- *Usine numérique*
- *Procédés innovants et durables*

V. REFERENCES

- [1] T. Moriwaki, "Multi-functional machine tool," CIRP Annals - Manufacturing Technology, vol. 57, no. 2, pp. 736-749, 2008.
- [2] E. Bohez, "Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 42, no. 4, pp. 505-520, 2002.
- [3] ISO 230-1, Code d'essais des machines-outils - Partie 1 : Exactitude géométrique des machines fonctionnant à vide ou dans des conditions quasi statiques, 2012.
- [4] R. Ramesh, M. Mannan and A. Poo, "Error compensation in machine tools — a review: Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 40, no. 9, pp. 1235-1256, 2000.
- [5] ISO 230-7, Code d'essais des machines-outils - Partie 7 : Exactitude géométrique des axes de rotation, 2007.
- [6] Y. Abbaszadeh-Mir, J. R. R. Mayer, G. Cloutier and C. Fortin, "Theory and simulation for the identification of the link geometric errors for a five-axis machine tool using a telescoping magnetic ball-bar," International Journal of Production Research, vol. 40, no. 18, pp. 4781-4797, 2002.
- [7] Z. Yu, L. Tiemin and T. Xiaoliang, "Geometric Error Modeling of Machine Tools Based on Screw Theory," Procedia Engineering, vol. 24, no. 0, pp. 845-849, 2011.
- [8] E. L. Bohez, B. Ariyajunya, C. Sinlapecheewa, T. M. M. Shein, D. T. Lap and G. Belforte, "Systematic geometric rigid body error identification of 5-axis milling machines," Computer-Aided Design, vol. 39, no. 4, pp. 229-244, 2007.
- [9] W. Lei and Y. Hsu, "Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D probe-ball. Part I: design and modeling," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 42, no. 10, pp. 1153-1162, 2002.
- [10] W. Lei and Y. Hsu, "Accuracy test of five-axis CNC machine tool with 3D probe-ball. Part II: errors estimation," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 42, no. 10, pp. 1163-1170, 2002.
- [11] M. Tsutsumi and A. Saito, "Identification and compensation of systematic deviations particular to 5-axis machining centers," International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 43, no. 8, pp. 771-780, 2003.
- [12] Y. Lin and Y. Shen, "Modelling of Five-Axis Machine Tool Metrology Models Using the Matrix Summation Approach," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 21, no. 4, pp. 243-248, 2003.
- [13] Groupe de Travail du Collège Métrologie du Mouvement français pour la Qualité - Techniques de Mesure sur MMT Fiche G550-1 et A230-1.