

Modélisation et caractérisation des défauts de structure de machine-outil 5 axes pour la mesure in-process

F. VIPREY^{a,b}, H. NOUIRA^b, S. LAVERNHE^a, C. TOURNIER^a

a. LURPA, ENS Cachan, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, F94235 Cachan

b. Laboratoire Commun de Métrologie (LNE-Cnam), 1, rue Gaston Boissier, 75724 Paris Cedex 15

fabien.viprey@ens-cachan.fr

Résumé :

Ces travaux de recherche portent sur la modélisation géométrique de machine-outil 5-axes, basée sur une paramétrisation normalisée des erreurs géométriques en vue de réduire l'erreur volumétrique au sein du volume de travail. L'identification du modèle est passé par le développement d'un nouvel étalon matériel thermo-invariant : la Multi-Feature Bar. Raccordé à la définition internationale du mètre par un étalonnage et une intercomparaison européenne, il permet d'envisager des mesures traçables sur machine-outil dans un environnement hostile. L'identification de trois paramètres intrinsèques à cet étalon, couplée à une procédure de mesure, assure une identification complète et traçable des erreurs de mouvement d'axes linéaires. Ensuite, l'identification des erreurs entre axes est quant à elle basée sur une procédure de palpation de sphère dans le volume de travail en minimisant la dérive temporelle de la structure ainsi que les effets des erreurs de mouvement précédemment identifiés. Au terme de ces travaux, le modèle développé, et partiellement identifié permet d'ores et déjà de caractériser 95 % de l'erreur volumétrique mesurée. Ainsi l'erreur volumétrique moyenne non caractérisée par le modèle ne s'élève qu'à 8 μm .

Abstract :

This research work deals with the geometric modeling of 5-axis machine tool based on a standardized parameterization of geometric errors with the aim to decrease the volumetric error in the workspace. The identification of the model's parameters is based on the development of a new standard thermo-invariant material namely Multi-Feature Bar. After its calibration and after a European inter-comparison, it provides a direct metrological traceability to the SI meter for dimensional measurement on machine tool in a hostile environment. The identification of three intrinsic parameters of this standard, coupled with a measurement procedure ensures complete and traceable identification of motion errors of linear axes. A model parameter identification procedure is proposed by probing a datum sphere in the workspace and minimizing the time drift of the structural loop and the effects of previously identified motion errors. Finally, the developed model partially identified, allows the characterisation of 95% of the measured volumetric error. Thus, the mean volumetric error not characterized by the model is only equal to 8 μm .

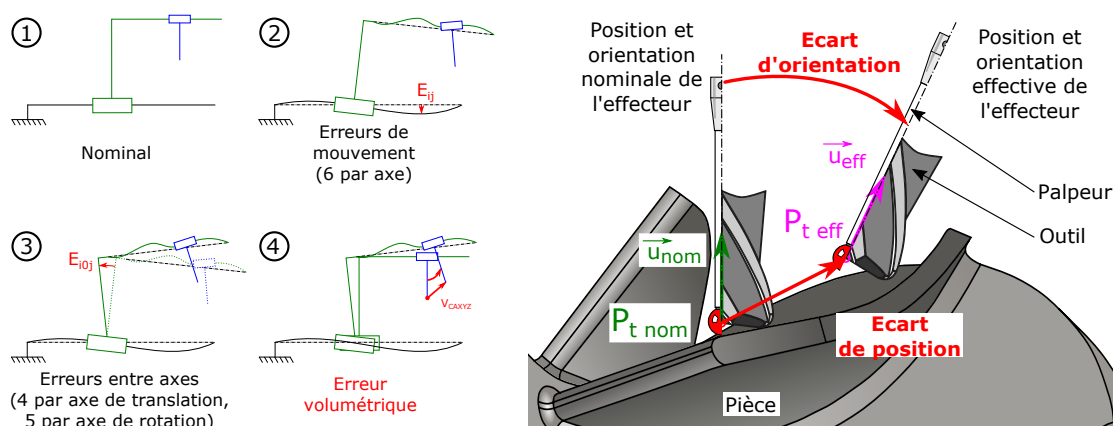
Mots clefs : Machine outil 5-axes, Modélisation, Identification, Erreurs géométriques, Étalon matériel

1 Introduction

Les machines outils (MO) dites multi-fonctionnelles sont des outils de production couramment utilisés dans l'industrie manufacturière. Cependant, malgré un besoin industriel clairement exprimé, ce nuancier de MO disponibles sur le marché n'a pas encore, à ce jour, la capacité de réaliser du contrôle traçable en ligne des entités géométriques produites. Bien que de la mesure soit tout de même envisagée sur MO pour le réglage d'une production, ou pour des spécifications dont les exigences sont compatibles avec les performances de la MO, celle-ci n'est pas traçable. La mesure obtenue par une MO est souvent affectée par les limitations des corrections géométriques intégrées à la Commande Numérique (CN), souvent obtenues dans des conditions assez éloignées des conditions réelles de service en atelier. En particulier les effets de l'environnement, de l'état thermique de la MO, son évolution au cours du temps, les modifications de structure liées au comportement dynamique, la maîtrise des trajectoires de l'effecteur sont autant de paramètres qui limitent les performances d'une MO comme système de mesure et ne permettent pas actuellement de statuer sur l'exactitude et le niveau d'incertitude du résultat. Dans ce contexte global, l'objectif est de maîtriser la géométrie de la structure de la MO pour améliorer, à court terme, le processus de fabrication des pièces usinées et à long terme, envisager de la mesure sur MO. Finalement, à long terme l'objectif est d'être doté d'une MO dont le niveau d'exactitude est inférieur à $10 \mu m$ dans son volume de travail. Cette maîtrise de la géométrie est basée sur une modélisation et une identification de la structure dans son comportement quasi-statique, comportement semblable à celui associé aux activités de mesures.

2 Erreurs géométriques

Une MO est un agencement de groupes cinématiques et de systèmes de mesure qui font partie intégrante de la boucle structurelle. Cette boucle est définie comme l'assemblage de composants qui maintient la position relative entre deux objets spécifiés ; un outil et une pièce par exemple [1]. Les erreurs géométriques normalisées sont spécifiées et paramétrées dans [1, 2]. Elles se décomposent en deux grandes classes : les erreurs de mouvement d'axe notées E_{ij} (figure 1a ②) et les erreurs de position et d'orientation d'axe notées E_{i0j} (figure 1a ③).



(a) Illustrations des erreurs de mouvement et des erreurs de position et orientation d'axe. (b) Erreur volumétrique dans un contexte de fabrication ou de mesure sur MO 5 axes.

FIGURE 1 – Erreur volumétrique V_{CAXYZ} sur MO : conséquence des erreurs géométriques E_{ij} et E_{i0j} .

Une MO 5-axes dénombre 30 erreurs de mouvement (6 erreurs par axe) et 19 erreurs de position et d'orientation d'axe (4 par axe de translation et 5 par axe de rotation). À ces erreurs s'ajoutent 12 erreurs géométriques dites d'assemblage notées $d_{i \text{ w ou t}}$: 6 composantes de positionnement de l'outil (t) en broche d'une part et 6 composantes de la pièce (w) sur le plateau ou la table de la machine d'autre part. Dans un contexte quasi-statique, les erreurs géométriques sont responsables à plus de 70 % de l'erreur volumétrique [3, 4] V_{CAXYZ} définie comme étant l'écart relatif maximal en position et en orientation de l'effecteur par rapport à la pièce exprimé dans l'espace pièce (Figure 1b).

3 Modèle géométrique

Dans le but d'identifier les erreurs géométriques, principales sources de cette erreur volumétrique V_{CAXYZ} constatée entre la géométrie effective et la géométrie nominale de la boucle structurelle, une modélisation du comportement biaisé et nominal de cette dernière est proposée. Cette modélisation repose sur la définition normalisée des erreurs géométriques et sur un formalisme de matrice de transformation homogène dans le cas d'un comportement quasi statique et infiniment rigide de la boucle structurelle. La modélisation est ensuite appliquée à une MO 5-axes Mikron UCP 710 dont la boucle structurelle est de type [w C' A' b X Y Z (C1) t] selon [5].

Par différence des coordonnées du point piloté de l'effecteur dans l'espace des tâches exprimées à l'aide des deux modèles (i.e. biaisé et nominal), il est possible d'explicitier l'erreur volumétrique V_{CAXYZ} dans l'espace des tâches en fonction des paramètres géométriques intrinsèques à la structure ξ , des paramètres géométriques de l'outil τ , des paramètres géométriques relatifs au posage de la pièce ψ , du vecteur \mathbf{q} des paramètres articulaires, ainsi que du vecteur \mathbf{E} d'erreurs géométriques (Équation 1).

$$V_{\text{CAXYZ}} = \left(\overrightarrow{P_{t \text{ nom}} P_{t \text{ eff}}} \right)_{6 \times 1} = [\delta x \ \delta y \ \delta z \ \delta i \ \delta j \ \delta k]^T = \mathbf{f}(\xi, \tau, \psi, \mathbf{q}, \mathbf{E}) \quad (1)$$

La mesure de position dans l'espace des tâches d'étalons ou d'artefacts permet de déduire une erreur volumétrique dans l'espace des tâches à partir d'une position nominale. Cette procédure est classiquement utilisée sur MO [6] car elle est simple à envisager et permet d'avoir une chaîne d'acquisition très courte et limitée à l'espace des tâches minimisant ainsi l'influence d'autres sources d'erreur. De plus, la mesure est directement égale aux composantes de l'erreur volumétrique. Ainsi, d'un point de vue opérationnel, la mesure est directement liée à l'effet des erreurs géométriques de la structure sur la géométrie des pièces fabriquées ou mesurées. En revanche, les mesures sont totalement découplées des valeurs articulaires qui sont, quant à elles, au même titre que les erreurs géométriques, inhérentes à la boucle structurelle. Pour avoir une image la plus fidèle possible de cette boucle, la stratégie est de modéliser le biais géométrique comme une variation articulaire engendrée par les erreurs géométriques [7]. Cette modélisation repose sur le fait que les points mesurés ont une position qui est constamment au nominal dans l'espace des tâches, c'est-à-dire que l'erreur volumétrique est nulle (pour chaque point mesuré $V_{\text{CAXYZ}} = 0$). Le biais géométrique $\delta \mathbf{q}_{\text{mod}}$ est alors défini comme la différence entre la configuration articulaire déviée, et la configuration articulaire nominale déduite du modèle (figure 2). Après linéarisation au premier ordre du biais géométrique vis-à-vis d'hypothèses de petits déplacements (i.e. petites rotations), cette différence s'écrit comme le produit d'une matrice de sensibilité \mathbb{S} par le vecteur d'erreurs \mathbf{E} (équation 2). La linéarisation a été validé par le développement d'une Machine Virtuelle (MV) conçue comme outil à la visualisation et la compréhension de l'erreur volumétrique. L'effet de linéarisation a pu ainsi être qualifié et quantifié par comparaison de l'erreur volumétrique issue du mo-

dèle complet et celle issue du modèle linéarisé au premier ordre pour des vecteurs d'erreurs dont les valeurs ont été choisies vraisemblables par rapport à celles identifiées dans la littérature.

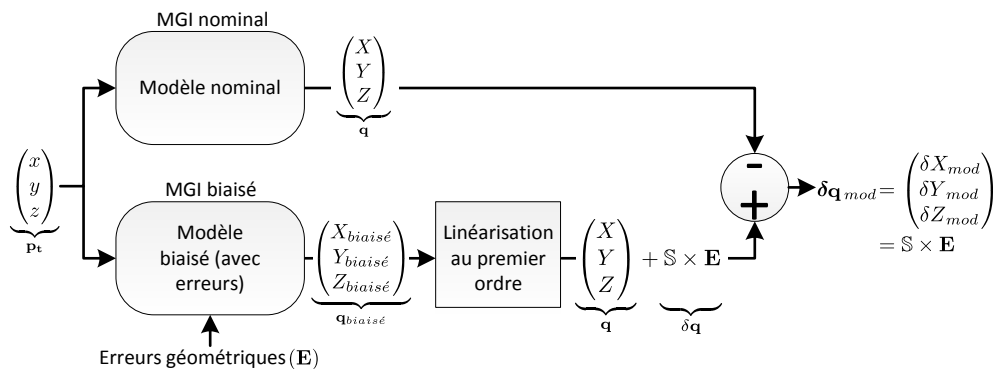


FIGURE 2 – Définition du biais géométrique $\delta \mathbf{q}_{\text{mod}}$.

$$\delta \mathbf{q}_{\text{mod}} = \begin{pmatrix} \delta X_{\text{mod}} \\ \delta Y_{\text{mod}} \\ \delta Z_{\text{mod}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{\text{biaisé}} - X \\ Y_{\text{biaisé}} - X \\ Z_{\text{biaisé}} - Z \end{pmatrix} = \mathbb{S} \times \mathbf{E}, \quad \text{où } \mathbb{S} = \mathbf{g}(\xi, \tau, \psi, \mathbf{q} = (A, C)) \quad (2)$$

4 Développement matériel

À partir de la mesure du biais géométrique modélisé (équation 2), il sera donc possible d'identifier le vecteur \mathbf{E} et ainsi réduire le biais géométrique articulaire et a fortiori l'erreur volumétrique de la boucle structurelle. Cette mesure du biais repose sur l'acquisition des positions articulaires des axes pour un point dont la position est pérenne dans l'espace des tâches.

4.1 Un nouvel outil de mesure articulaire temps réel

La configuration articulaire déviée est mesurée directement sur les règles de mesure lors d'un déclenchement de palpeur 3D agissant comme un détecteur de zéro. La configuration articulaire nominale est quant à elle, déduite du modèle géométrique nominal de la structure.

La configuration articulaire déviée est obtenue par utilisation des moyens de mesure embarqués dans une MO actuelle : un palpeur et ses règles de mesure. Une architecture matérielle par l'intégration physique d'un palpeur 3D de haute exactitude ($2\sigma = 0,25 \mu\text{m}$ à 240 mm/min) au sein de la MO permet la mesure de points dans l'espace des tâches. À la suite de cette intégration matérielle, un logiciel est développé pour synchroniser en temps réel (résolution = 10 nm, fréquence d'acquisition = 33kHz) l'état du stylet et l'information issue des codeurs des règles de mesures. L'objectif est d'obtenir après les Prises d'Origine Machine (POM), la position brute et absolue des axes sans aucune compensation ou traitement mal maîtrisés de la Commande Numérique (CN) industrielle. L'architecture du système de mesure appelé LURPAIpeur se veut donc totalement autonome du comportement de la CN existante. Ce nouveau moyen de mesure, après sa qualification permet d'obtenir une mesure de position articulaire dont l'incertitude est évaluée à $0,2 \mu\text{m}$ à 100 mm/min et une répétabilité de mesure de $0,97 \mu\text{m}$ (Figure 3).

4.2 Un nouvel étalon matériel : la Multi-Feature Bar (MFB)

La validation de la condition d'erreur volumétrique nulle dans l'espace des tâches pour une position donnée est rendue possible par recours à un étalon matériel raccordé à la définition du mètre

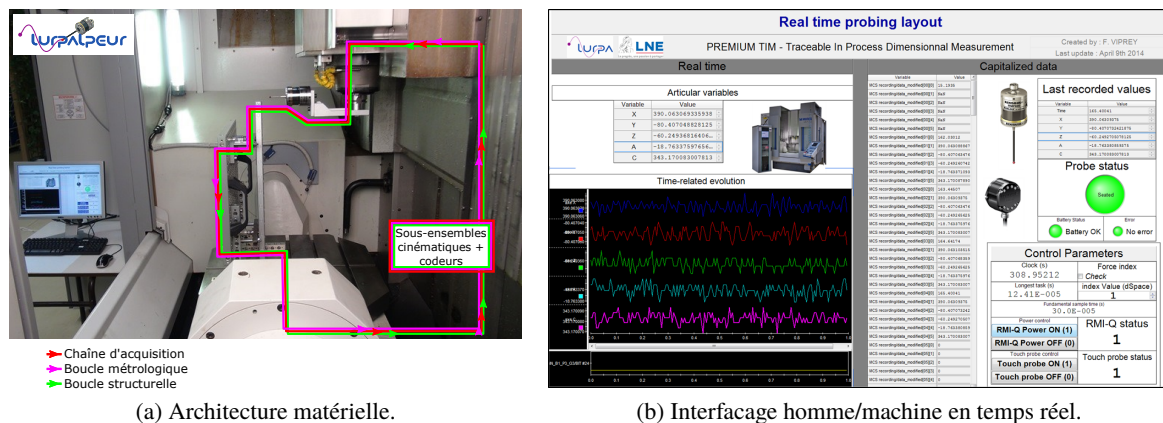
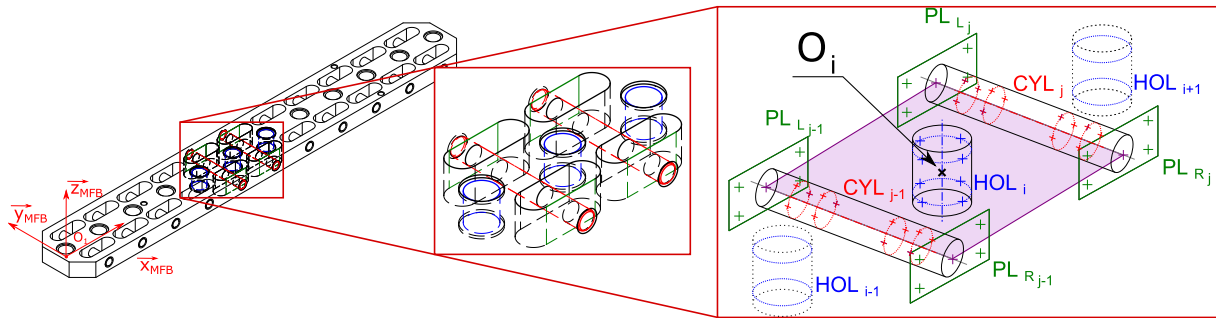


FIGURE 3 – Dispositif expérimental de palpage sur MO : le LURPALpeur

SI. À partir d'une étude des étalons existants utilisés sur MO ou sur MMT et de leurs avantages et inconvénients, un nouvel étalon matériel a été proposé : la Multi-Feature Bar (MFB). Sa matérialisation physique en Invar lui confère une géométrie thermo-invariante (ratio $\alpha/\lambda = 7, 7 \cdot 10^{-8} m \cdot W^{-1}$). La MFB est une succession de motifs élémentaires incluant des entités canoniques telles que des plans et des cylindres. La mesure de ces entités garantit l'identification de 3 paramètres intrinsèques locaux dans son repère local : une erreur de positionnement linéaire $E_{xx_{MFB}}$ et deux erreurs de rectitude $E_{yx_{MFB}}$ et $E_{zx_{MFB}}$, pour un seul positionnement de la MFB dans le volume de travail [8]. La mise en position isostatique, minimisant les déformations de la MFB, ainsi que le maintien en position offrent à l'opérateur une grande souplesse dans le choix du positionnement (position et orientation) de celle-ci dans l'espace de travail de la machine. Par ailleurs, la géométrie de la MFB assure une accessibilité totale et bilatérale des entités canoniques des différents motifs. Cet atout a permis d'envisager un étalonnage sur une MMT raccordée à la définition du mètre étalon SI par une méthode de retournement. Cette méthode a pour rôle de séparer les erreurs géométriques de la MMT de celles de la MFB et supprime les erreurs de mesure rémanentes lors de l'étalonnage. Ces erreurs de mesure sont essentiellement dues aux erreurs géométriques résiduelles de la MMT. Une méthode de compensation des erreurs géométriques dans le cas de l'étalonnage de l'erreur de positionnement linéaire a été abordée, car le retournement ne permet pas la séparation des erreurs de positionnement linéaire de la MMT de celles de la MFB.

Dans le cadre du projet européen [IND62: JRP-TIM](#), une intercomparaison a été mise en place pour assurer un niveau de confiance suffisant de l'étalonnage de la MFB au LNE, et pour estimer la reproductibilité de la méthode d'étalonnage. Le pilotage de cette campagne et la participation des différents laboratoires nationaux de métrologie à cette intercomparaison européenne démontrent l'efficacité de notre MFB conçue et réalisée au LNE ainsi que la maîtrise de son étalonnage par le traitement des données de mesure. À ce stade de l'étude, sous réserve de conservation d'un étalon [9], le LNE est désormais doté d'un étalon matériel thermo-invariant offrant trois paramètres intrinsèques contrairement aux barres à trous disponibles sur le marché. En conclusion, par ses concepts métrologiques, sa géométrie, et son étalonnage, la MFB est désormais reconnue par ses pairs en Europe.

FIGURE 4 – Multi-Feature Bar : Modèle, détail du motif et construction du point d'intérêt O_i .

5 Identification des paramètres du modèle

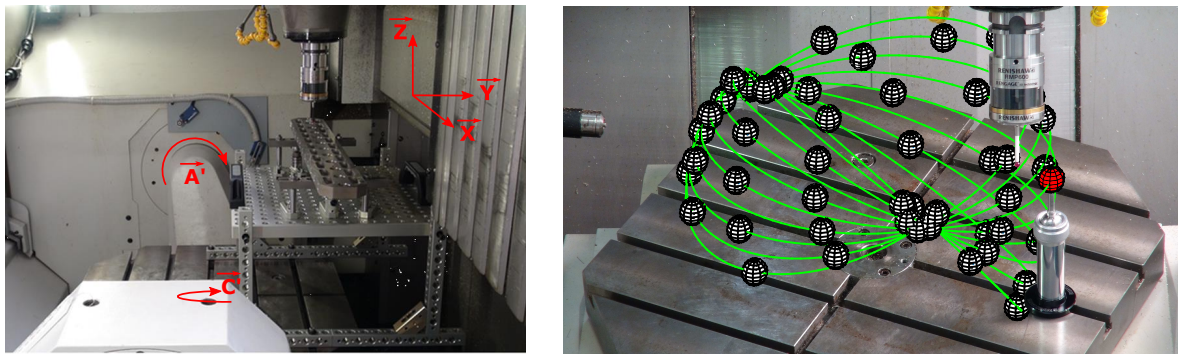
La mesure directe des règles de mesure à l'aide du LURPAL pour des points dont la position est supposée invariante dans l'espace des tâches, donne accès au biais géométrique mesuré (3).

$$\begin{aligned}
 \delta \mathbf{q}_{\text{mes}} = & \underbrace{\delta \mathbf{q}_{\text{mes}}(E_{i0j})}_{\text{effets des erreurs de position et d'orientation}} + \underbrace{\delta \mathbf{q}_{\text{mes}}(d_{i w \text{ ou } t})}_{\text{effets des erreurs d'assemblage}} \\
 & + \underbrace{\delta \mathbf{q}_{\text{mes}}(E_{ij})}_{\text{effets des erreurs de mouvement}} + \underbrace{\delta \mathbf{q}_{\text{mes}}(\epsilon)}_{\text{effets des erreurs aléatoires}} \quad (3)
 \end{aligned}$$

Cette équation traduit la dépendance entre les effets des erreurs géométriques sur le biais mesuré $\delta \mathbf{q}_{\text{mes}}$. Par soucis de clareté, le terme d'interdépendance (i.e. de couplage entre erreurs) n'est pas mentionné. Pour autant, cette dépendance a été mathématiquement explicitée. Dans le but de découpler un maximum les effets des erreurs géométriques, la procédure d'identification a été scindée en deux activités principales :

- l'identification des erreurs de mouvement par 11 mesurages de la MFB, soit 8 positionnements de celle-ci dans l'espace de travail (réduit à 5 par recours aux axes de rotation) (Figure 5a). L'ensemble de l'identification est détaillée dans [8],
- après compensation des erreurs de mouvement et des dérives temporelles de la MO, l'identification des erreurs de position et d'orientation d'axe et des erreurs d'assemblages a été menée grâce au palpé d'une sphère étalon dans 50 configurations articulaires différentes réparties dans le volume de travail (Figure 5b).

La procédure d'identification par palpé de sphère étalon a été validée préalablement sur la MV. Cette machine virtuelle sert à contrôler la qualité de la méthode d'identification en générant une machine parfaite entachée d'erreurs géométriques. Elle a également permis de réduire le nombre minimal de paramètres du modèle pour représenter les erreurs de position et d'orientation d'axe. Une analyse de sensibilité des paramètres de réglage de la procédure de mesure ainsi que des effets de bruit et des erreurs numériques permettent de statuer sur la qualité de l'identification. Cette qualité d'identification est évaluée à l'aide du résidu d'identification $\mathbf{r}(\hat{\mathbf{E}})$ illustré sur la figure 6, comme la différence entre le biais géométrique mesuré $\delta \mathbf{q}_{\text{mes}}$ et le biais modélisé $\delta \mathbf{q}_{\text{mod}}$ à l'aide du modèle identifié au premier ordre. Il quantifie la part du biais géométrique mesuré qui est caractérisé par les effets au premier ordre par les erreurs géométriques identifiées $\hat{\mathbf{E}}$. La valeur quantitative du résidu peut être due au effets de



(a) Identification des erreurs géométriques des trois axes linéaires grâce à la MFB.

(b) Identification des erreurs de position et d'orientation d'axe et des erreurs d'assemblage grâce au palpage d'une sphère.

FIGURE 5 – Campagnes d'identification des erreurs géométriques de la boucle structurelle de la Mikron UCP 710.

linéarisation du modèle au premier ordre (limite de l'hypothèse de petites rotations), à la dynamique de la boucle structurelle, à son chargement thermo-mécanique et au condition environnementale variable d'atelier.

Pour autant, en ce qui concerne le terme traduisant les effets des erreurs aléatoires de moyenne nulle (Équation 3), il a été minimisé par la répétition des mesurages sur plusieurs journées afin de qualifier le comportement quasi-rigide [6] de la structure. Cette répétition des mesurages caractérise la répétabilité et reproductibilité de mesure nécessaire à la propagation des incertitudes. Cette propagation d'incertitudes de mesure a également été développée pour quantifier l'incertitude d'identification des erreurs et donc de l'erreur volumétrique. À terme, cette incertitude d'identification sera l'une des briques de base à la quantification des incertitudes de mesure sur MO dite raccordée.

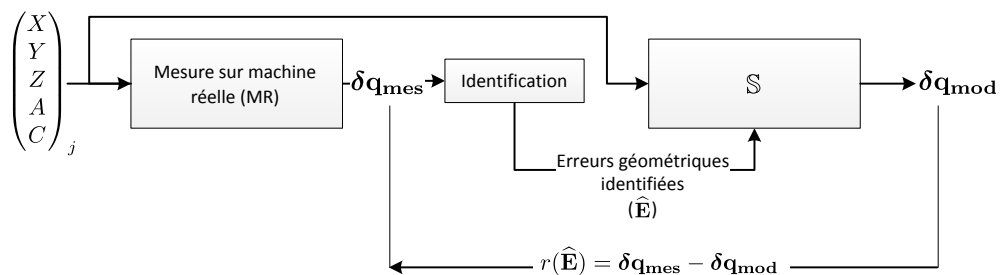


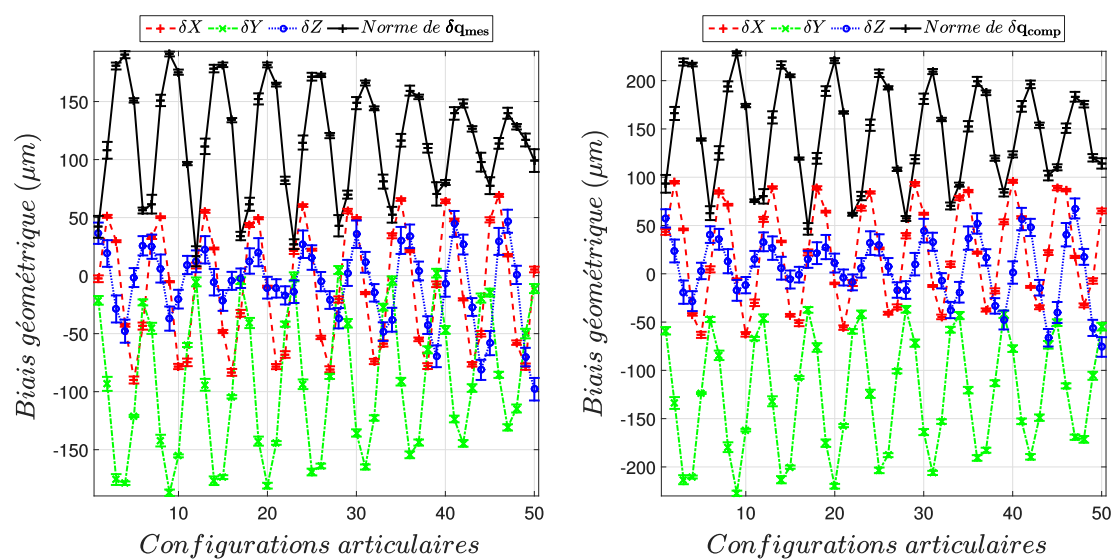
FIGURE 6 – Résidu d'identification $r(\hat{\mathbf{E}})$.

6 Résultats

La procédure d'identification des erreurs de mouvement nécessite une journée d'immobilisation de la MO (13 min de mesure automatisée par palpé complet de la MFB, soit 316 points) contre 52 min pour l'identification des erreurs de position et d'orientation d'axe et d'assemblage. Cette dernière est basée sur le palpé de 50 configurations articulaires, soit 450 points mesurés. La mesure a été reproduite 10 fois pendant deux jours. La reconstruction des centres des sphères associées permet de déduire $\delta \mathbf{q}_{\text{mes}}$. Les variations des composantes du biais et sa norme sont illustrées sur la figure 7a. La norme

moyenne du biais est de $118 \mu\text{m}$ et atteint jusqu'à $191 \mu\text{m}$ dans le volume de travail. Les oscillations visibles sont dues aux effets des erreurs de position et d'orientation d'axe sur un tour de plateau (paramètre articulaire C). Les barres d'incertitudes traduisent quant à elles la dispersion due à la reproductibilité de positionnement de la MO sur deux jours d'essais sous conditions environnementales variables.

L'étude du résidu illustrée par la figure 8a, confirme que le biais géométrique modélisé $\delta\mathbf{q}_{\text{mod}}$ permet de caractériser 90 % de la mesure ($\delta\mathbf{q}_{\text{mes}}$). Il est nécessaire de rajouter l'importance de la mise en température de la machine (éléments de transmissions et de guidage), car un essai sur MO froide (conditions différentes de celles de service) engendre une identification très médiocre puisque la norme du résidu moyen d'identification est alors de $48 \mu\text{m}$. Dans le cas d'une boucle structurelle mise en température, la norme de ce résidu moyen est de $11,5 \mu\text{m}$.



(a) Composantes et norme de $\delta\mathbf{q}_{\text{mes}}$ sans compensation des effets des erreurs de mouvement.

(b) Composantes et norme de $\delta\mathbf{q}_{\text{comp}}$ avec compensation des effets des erreurs de mouvement.

FIGURE 7 – Impact de la compensation des effets des erreurs de mouvement sur $\delta\mathbf{q}_{\text{comp}}$

À la suite de la modélisation du biais géométrique induit par les erreurs de mouvement d'axes linéaires, la compensation de ce biais a été opérée sur le biais géométrique initialement mesuré $\delta\mathbf{q}_{\text{mes}}$. Par conséquent, le biais géométrique mesuré par palpé de sphère de référence n'est plus que l'effet des erreurs de position et d'orientation d'axe, des erreurs de mouvement des axes de rotation, des dérives thermiques et d'autres sources de perturbations aléatoires. Ce biais géométrique $\delta\mathbf{q}_{\text{comp}}$ compensé des effets des erreurs de mouvement d'axes linéaires et des dérives temporelles est illustré sur la figure 7b dont la valeur moyenne est de $145 \mu\text{m}$ pour une valeur maximale allant jusqu'à $228 \mu\text{m}$.

Il est possible de noter une meilleure caractérisation du biais géométrique $\delta\mathbf{q}_{\text{comp}}$, puisque le résidu d'identification a diminué entre l'identification simple et celle après compensation des effets des erreurs de mouvement. En effet, une réduction de $3,4 \mu\text{m}$ sur la norme du résidu moyen d'identification est observée entre la figure 8a et 8b. Aussi, la distribution des valeurs est globalement centrée sur $8 \mu\text{m}$ et 45 configurations ont une norme de résidu en dessous de $11 \mu\text{m}$. Alors que précédemment, la distribution des valeurs était globalement centrée sur $11 \mu\text{m}$ avec 45 configurations en dessous de $18 \mu\text{m}$.

Dans l'ensemble, une fois les erreurs de mouvement compensées, l'identification permet une

caractérisation moyenne à hauteur de 94,5 % du biais géométrique. De plus, les écarts entre les composantes du biais mesurées et les composantes du biais géométrique modélisé n'excèdent pas $3 \mu\text{m}$, ce qui dénote une bonne caractérisation de ce biais par le modèle.

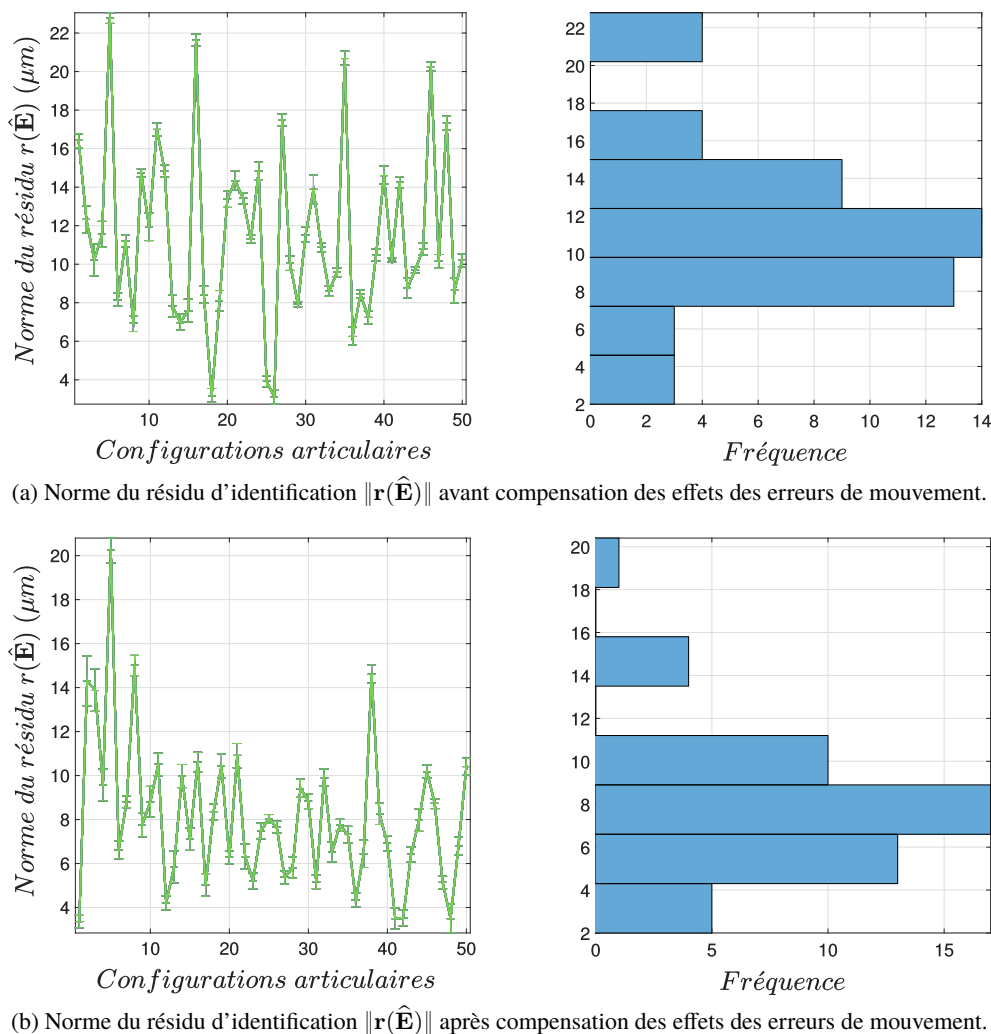


FIGURE 8 – Norme du résidu d'identification.

7 Conclusion

La modélisation et la caractérisation de la géométrie réelle d'une structure poly-articulée de MO sont en lien direct avec les besoins industriels d'avoir des moyens de production de très haute performance tant sur la productivité que sur la qualité des entités géométriques usinées dont la mesure en ligne est traçable. Pour aboutir à une erreur volumétrique inférieure à $10 \mu\text{m}$, ces travaux ont été orientés pour répondre à la problématique scientifique suivante :

Comment modéliser et identifier l'état géométrique d'une boucle structurelle à partir de procédures de mesures simples à mettre en œuvre dans un flux de production, le tout en assurant une traçabilité métrologique de la mesure, dans le but de modéliser l'erreur volumétrique le plus fidèlement possible ?

Au terme de ces activités, le modèle développé, et partiellement identifié (identification des erreurs de mouvement ainsi que des erreurs de position et d'orientation d'axe), nous permet d'ores et déjà de caractériser 95 % du biais géométrique mesuré. Ainsi le biais géométrique moyen non caractérisé s'élève

à 8,1 μm , alors que les performances volumétriques indiquées par les constructeurs à la réception de la MO 5-axes n'étaient que de 50 μm .

Remerciements

Ces travaux de recherche ont été financés par le projet européen de recherche en métrologie (EMRP) [IND62: JRP-TIM \(Traceable dimensional In-process Measurement\)](#). Les auteurs remercient sincèrement le consortium de cet EMRP financé conjointement par les pays participant au projet, membres de l'EURAMET et par l'Union européenne.

Références

- [1] NF ISO 230-1 : 2012, Code d'essais des machines-outils - Partie 1 : Exactitude géométrique des machines fonctionnant à vide ou dans des conditions quasi-statiques.
- [2] NF ISO 230-7 : 2007, Code d'essais des machines-outils - Partie 7 : Exactitude géométrique des axes de rotation.
- [3] Ramesh, R., Mannan, M. et Poo, A. (2000). Error compensation in machine tools - a review : Part I : geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(9) :1235 - 1256.
- [4] Andolfatto, L., Lavernhe, S. et Mayer, J. (2011). Evaluation of servo, geometric and dynamic error sources on five-axis high-speed machine tool. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(10–11) :787 – 796.
- [5] NF ISO 10791-6 : 2014. Conditions d'essai pour centres d'usinage – Partie 6 : Précision des vitesses et interpolations.
- [6] Schwenke, H., Knapp, W., Haitjema, H., Weckenmann, A., Schmitt, R. et Delbressine, F. (2008). Geometric error measurement and compensation of machines - an update. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(2) :660 – 675.
- [7] Viprey, F. (2016). Modélisation et caractérisation des défauts de structure de machine-outil 5 axes pour la mesure in-process. Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 315 pages.
- [8] Viprey, F., Noura H., Lavernhe S., et Tournier C. (2016). Novel multi-feature bar design for machine tools geometric errors identification. *Precision Engineering*, 46 :323 – 338.
- [9] JCGM 200 (2012). Vocabulaire International de Métrologie légale (VIM) – Bureau International des Poids et Mesures.