

Année universitaire 2022-2023  
Sujet de Stage de Master 2 Recherche de 5 à 6 mois

# ***Caractérisation géométrique des rotations de MOCN 5 axes par mesure *in situ* et in process pour l'usinage de haute exactitude***

## **Mots clés :**

Mesure *in situ* ; mesure in process, MOCN 5 axes ; conception ; instrumentation ; Identification d'erreurs géométriques ; BallBar

## **I. Contexte :**

Les Machines-Outils (MOs) sont des moyens de production couramment utilisés dans l'industrie manufacturière. Leur marché international (production et exploitation) est en nette augmentation depuis les deux dernières décennies. Le contexte de forte concurrence a fait émerger de nouvelles structures dites multi-fonctionnelles qui assurent à l'utilisateur une grande diversité d'opérations possibles sur le même moyen de production en alliant productivité et qualité des entités géométriques fabriquées. Par conséquent, la complexité des pièces produites sur ce genre de moyens a fortement augmenté avec des gains en coûts, qualité et temps de production.

Malgré un besoin industriel international clairement exprimé, ce nuancier de MOs disponibles sur le marché n'a pas encore, à ce jour, la capacité de tenir des niveaux d'exactitude souhaitée ( $<10 \mu\text{m}$ ) sur l'ensemble de son volume de travail. En fonction de la cinématique machine et de la configuration d'usinage, l'écart maximal dans le volume appelé exactitude volumétrique est actuellement de plusieurs dixièmes de millimètre, voir du millimètre dans les cas extrêmes. Une condition préalable pour améliorer de manière significative les processus de fabrication est l'incorporation de la métrologie dimensionnelle traçable directement sur les MOs (i.e. raccordée à la définition du mètre SI). Le projet a pour finalité l'amélioration la qualité des pièces usinées directement dans l'atelier par contrôle métrologique intermédiaire de la pièce *in situ* (i.e. directement sur le moyen de fabrication).

## **II. Problématique scientifique et objectifs et méthodologie inhérents :**

Dans le cadre du projet [ANR JCJC INTEGRATION](#), un système mesurant est en cours de développement à des fins de caractérisation des erreurs géométriques d'axes de rotations d'une MOCN 5-axes. Ces erreurs géométriques sont au nombre de 6 et illustrée à la Figure 1. Elles pourront être identifiées par l'intermédiaires de capteurs capacitifs sans contact couplés à des méthodes multi-steps, multi-capteurs et multi-retournement.

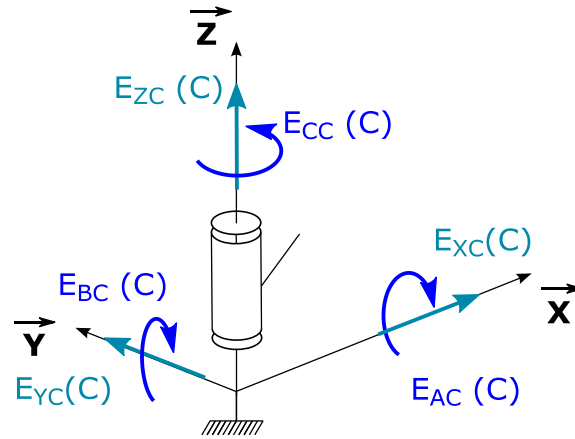


Figure 1 : Paramétrage géométrique d'un liaison pivot selon l'ISO 230-1:2012 et l'ISO 230-7:2007.

L'industrie n'étant pas dotée de système de mesure permettant cette caractérisation, les résultats obtenus ne seront pas directement comparables à une méthodologie connue et maîtrisée.

Ainsi, l'objectif du stage de master 2 recherche est de proposer une autre méthodologie de caractérisation à des fins de comparaisons. Cette méthodologie sera basée sur la modélisation géométrique du comportement de l'axe étudié. L'identification des erreurs sera basée sur une mesure en machine (i.e. in situ) par recours à un instrument usuel de caractérisation de géométrie machine ou de diagnostic : BallBar QC20-W de Renishaw (Figure 2). Cet instrument sans fil en liaison Bluetooth avec un PC d'acquisition permet la mesure 1D de l'évolution de distance entre les deux sphères de références au cours d'un suivi de trajectoire préalablement définie et exécutée par la MOCN.



Figure 2 : Exemple de caractérisation sur machine HSM600U du LaBoMaP à gauche grâce à un Ballbar QC20-W à droite

### III. Objectifs scientifiques et opérationnels inhérents de la problématique :

L'objectif du stage est :

- Utiliser le Ballbar dans un contexte 3 axes (méthode classiquement utilisée) afin de monter en compétences sur du pilotage de machine et mise en œuvre de la mesure
- Concevoir un montage permettant la mise et maintien en position du Ballbar en vue de caractériser les axes de rotations de la structure 5 axes étudiée dans un contexte

Caractérisation géométrique des rotations de MOCN 5 axes par mesure *in situ* et in process pour l'usinage de haute exactitude

quasi-statique, puis dynamique. Le stagiaire envisagera une mesure *in situ* (en machine hors procédé d'usinage) puis *in-process* (en machine pendant le procédé d'usinage)

- Proposer une méthodologie de mesure sur machine par des mouvements exclusivement de rotation d'axes.
- Exploiter la mesure pour identifier les paramètres normalisés illustrés en Figure 1 intégrés à un modèle de comportement géométrique d'axe de rotations.

#### IV. **Connaissances et compétences attendues ou développées durant le stage par le stagiaire :**

- Pilotage de MOCN 5 axes
- Modélisation géométrique réaliste des structures de production
- Mise en place de méthodologies de mesures sur machine
- Maîtrise de chaînes d'acquisition numérique
- Gestion de données de mesures
- Développement de routine informatique de traitement de la donnée
- Identification de paramètres
- Méthodes numériques

#### V. **Détails pratiques**

- **Tuteur universitaire :**

**Fabien VIPREY**

Maître de Conférences

Dr. Agrégé de Génie Mécanique

☎ +33 (0)3 85 595 359

☎ +33 (0)6 86 075 807

✉ [fabien.viprey@ensam.eu](mailto:fabien.viprey@ensam.eu)

📍 École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers  
Rue Porte de Paris, F-71250 CLUNY

- **Informations pratiques :**

- Lieu d'exercice du stage de Master : [ENSAM campus de Cluny \(71250\)](#) situé en région Bourgogne à 400km de Paris
- Indemnisation : une indemnisation mensuelle du stage de master est prévue à hauteur de 577,5€/mois (mois à temps plein).
- Hébergement : un logement en résidence universitaire est possible sur place (320€/mois)
- Restauration : un restaurant universitaire permet la restauration midi et soir pour un montant de 3,25€
- Venue depuis Paris :
  - En train : Paris Gare de Lyon -> Mâcon Loché (1h45 de TGV via la [SNCF](#)) + 20 minutes de bus (2€ via la compagnie [Mobigo](#), ligne LR701)
  - [En voiture](#) : Le campus de Cluny est situé à 4h de Paris (289 km) via l'autoroute A6

#### VI. **Références bibliographiques :**

1. Lou ZF, Liu L, Zhang JY, Fan K chao, Wang XD. A self-calibration method for rotary tables' five degrees-of-freedom error motions. Measurement. avr 2021;174:109067.

2. Xu K, Li G, Li Z, Dong X, Xia C. A general identification method for position-dependent geometric errors of rotary axis with single-axis driven. Int J Adv Manuf Technol [Internet]. 2

Caractérisation géométrique des rotations de MOCN 5 axes par mesure *in situ* et *in process* pour l'usinage de haute exactitude

janv 2021 [cité 7 janv 2021]; Disponible sur: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-020-06530-0>

3. Geng Z, Tong Z, Jiang X, EPSRC Future Metrology Hub, Centre for Precision Technologies, University of Huddersfield, Huddersfield, HD1 3DH, UK. Review of geometric error measurement and compensation techniques of ultra-precision machine tools. *Light: Advanced Manufacturing*. 2021;2(1):1-17.
4. Liu L, Lou ZF, Huang YB, Fan KC, Zhang JY. A five degrees-of-freedom errors measurement system for rotary axis with reference laser for reference axis alignment. *Review of Scientific Instruments*. 1 juill 2020;91(7):075101.
5. Chen Q, Maeng S, Li W, Zhou Z, Min S. Geometric- and force-induced errors compensation and uncertainty analysis of rotary axis in 5-axis ultra-precision machine tool. *Int J Adv Manuf Technol*. juill 2020;109(3-4):841-56.
6. Zha J, Li L, Han L, Chen Y. Four-station laser tracer-based geometric error measurement of rotary table. *Meas Sci Technol* [Internet]. 20 déc 2019 [cité 6 févr 2020]; Disponible sur: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/ab64ab>
7. Li C, Liu X, Li R, Wu S, Song H. Geometric Error Identification and Analysis of Rotary Axes on Five-Axis Machine Tool Based on Precision Balls. *Applied Sciences*. 20 déc 2019;10(1):100.
8. Wang Z, Wang D, Dong H, Yu S. An invariant method updating Abbe principle for accuracy test and error calibration of rotary pairs in machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. juin 2019;141:46-58.
9. Jiang X, Wang L, Liu C. Investigation of rotary axes geometric performance of a five-axis machine tool using a double ball bar through dual axes coordinated motion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [Internet]. 12 mai 2019 [cité 29 mai 2019]; Disponible sur: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-019-03772-5>
10. Praniewicz M, Kurfess TR, Saldana C. Error qualification for multi-axis BC-type machine tools. *Journal of Manufacturing Systems* [Internet]. avr 2019 [cité 29 mai 2019]; Disponible sur: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0278612519300147>
11. Li J, Feng Q, Bao C, Zhang B. Method for simultaneously and directly measuring all six-DOF motion errors of a rotary axis. *Chin Opt Lett*. 10 janv 2019;17(1):011203.
12. Huang N, Jin Y, Li X, Liang L, Wu S. Identification of integrated geometric errors of rotary axis and setup position errors for 5-axis machine tools based on machining test. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [Internet]. 8 janv 2019; Disponible sur: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-03223-7>
13. Bao C, Feng Q, Li J. Simultaneous Measurement Method and Error Analysis of the Six Degrees-of-Freedom Motion Errors of a Rotary Axis. *Applied Sciences*. 13 nov 2018;8(11):2232.
14. Bao C, Li J, Feng Q, Zhang B. Error-compensation model for simultaneous measurement of five degrees of freedom motion errors of a rotary axis. *Measurement Science and Technology* [Internet]. 30 avr 2018 [cité 7 mai 2018]; Disponible sur: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6501/aac119>