

Etude et développement d'un procédé métrologiquement assisté pour l'usinage multi-axes : vers une assistance métrologique par jumeau numérique de machine-outil multi-axes

I. Introduction

La maîtrise du processus complet d'élaboration de pièces de forme complexe est indispensable dans l'industrie, en particulier, l'automobile, l'aéronautique, la fabrication d'outillages ou encore la réalisation de prothèses. Pourtant, ce processus est composé de plusieurs étapes (Figure 1), faisant intervenir dans chacune d'elles de nombreux paramètres et échanges d'informations. A partir d'une activité de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) qui porte sur l'obtention d'un modèle géométrique nominal de la pièce à réaliser en respectant des spécifications géométriques et dimensionnelles, un modèle FAO décrit sous forme de trajectoires outil est généré. Les trajectoires sont interprétées puis exécutées sur la machine-outil à commande numérique (MOCN), et finalement l'exécution de la trajectoire permet l'interaction outil/matière et d'obtenir la pièce usinée à l'aide de la cellule élémentaire d'usinage (CEU).

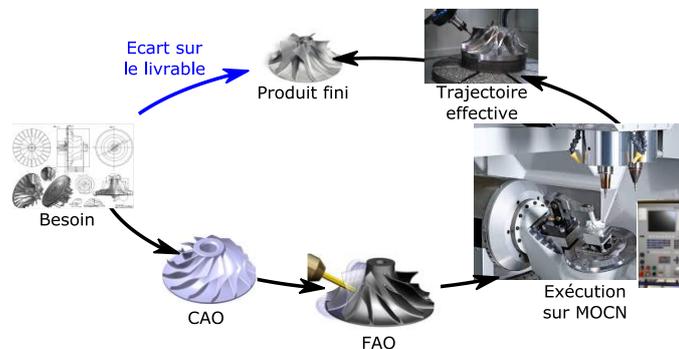


Figure 1 : Processus d'élaboration complet.

Un grand nombre de paramètres intervenant à chaque étape du processus d'élaboration des pièces ainsi que les échanges d'informations entre activités constituent des difficultés et des limites pour la maîtrise du processus global en termes de productivité et de qualité du produit fini. Chaque étape représente une source potentielle d'erreurs, ce qui induit des écarts géométriques ou dimensionnels sur la pièce usinée, pouvant conduire à sa non-conformité avec le modèle nominal spécifié. Le processus d'élaboration complet d'une pièce mécanique comporte différentes sources d'écarts qui peuvent provenir par exemple :

- Des écarts liés à la FAO via les paramètres de discrétisation choisis dans la définition de la stratégie d'usinage,
- Des écarts d'interpolation liés à la Transformation Géométrique Inverse (TGI) de la Commande Numérique (CN),
- des écarts liés à la qualité des guidages (i.e. aux liaisons), de l'assemblage entre liaisons, de même qu'à la dilatation thermique et aux déformations de la structure,
- des écarts engendrés par le phénomène d'enlèvement de matière dû aux défauts liés à l'usure sur l'outil, à la flexion et des déformations de l'outil ainsi que de la pièce,
- Des écarts associés aux dilatations thermiques et aux vibrations.

A partir de ce diagnostic, il est nécessaire pour satisfaire à un niveau de tolérance de plus en plus faible de maîtriser les diverses grandeurs d'influence de la variabilité procédé par rapport à un objectif idéal fixé via le modèle nominal.

L'identification et la compréhension des sources d'erreurs pouvant induire de la variabilité sur le processus de fabrication représente une première étape à réaliser, suivi d'une deuxième

étape de compensation (i.e. correction). Une des principales sources d'erreurs est constituée des écarts liés à la géométrie de la machine-outil, c'est-à-dire les différences pouvant exister entre la géométrie effective de la machine-outil et son comportement géométrique nominal. Cette source d'écarts regroupe l'ensemble des défauts de mouvement d'axes linéaires et de rotations, de même que les défauts de position et d'orientation de ligne moyenne d'axe. Ces caractérisations étudiées dans la communauté internationale ont été également menés dans le cadre de travaux au LURPA de l'ENS Paris-Saclay, et sont complétés actuellement au sein du LaBoMaP de l'ENSAM Cluny par le [projet ANR JCJC INTEGRATION](#). Ces écarts peuvent évoluer en fonction des variations thermiques et des chargements liés au processus d'usinage. De ces erreurs géométriques résultent un écart dit volumétrique au niveau de l'outil. Cet écart volumétrique est la conséquence de la déviation entre la position et l'orientation théorique programmée de l'outil et sa position et orientation réelles. Cet écart a une incidence de premier ordre sur la qualité dimensionnelle et géométrique de la pièce usinée. Actuellement, le [projet CAPTURE5](#) au sein du LaBoMaP de l'ENSAM Cluny a pour objectif de développer des stratégies de corrections en temps réel par action sur la boucle de rétroaction de position d'asservissement d'axes.

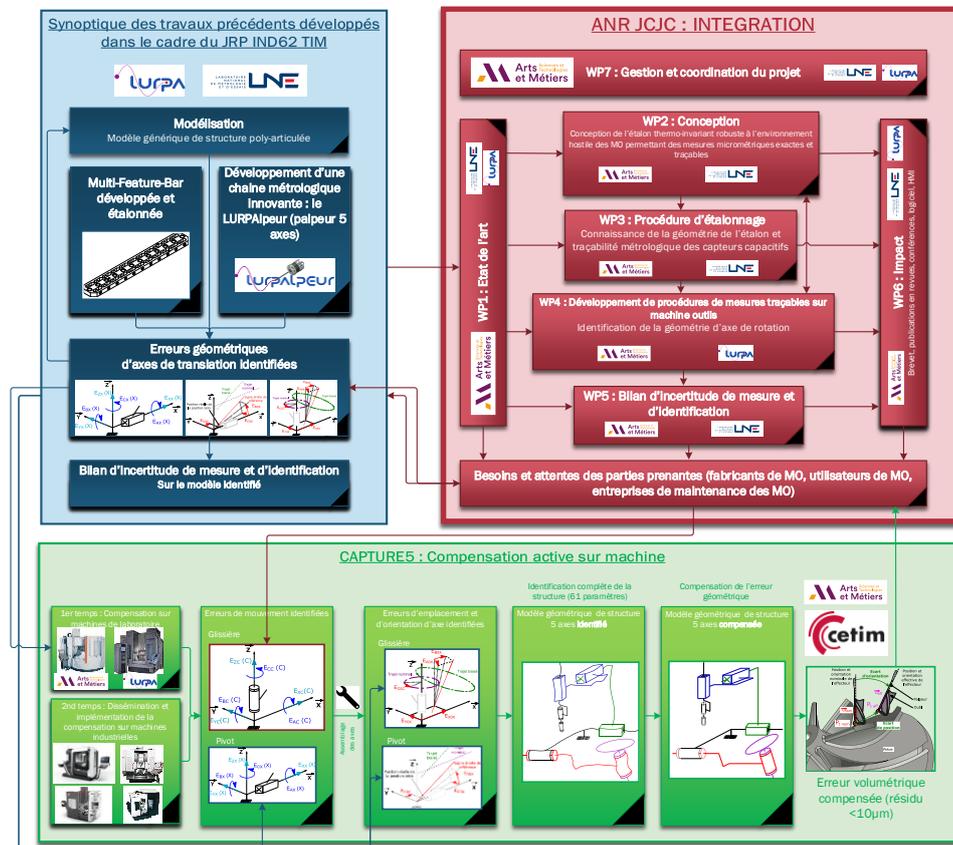


Figure 2 : Articulation des travaux passés et en cours.

La qualité des pièces produites sur machine-outil découle principalement du degré de d'exactitude et de stabilité des machines elles-mêmes. Cependant, une simple mesure ne permet pas d'identifier la contribution de chaque source d'erreur affectant la pièce. Les erreurs peuvent être classées selon la phase de travail pendant laquelle les sources qui les génèrent sont actives. De façon générale, l'exactitude est fortement limitée par la structure géométrique de la machine et par la modification de cette structure sous des conditions statiques, thermiques et dynamiques. Les sources d'erreurs durant l'usinage peuvent être

regroupées selon trois catégories : sources d'erreurs dues à la machine, au procédé de coupe et à l'environnement.

L'exactitude d'une machine-outil est définie par l'exactitude volumétrique de la boucle structurale comme étant « l'amplitude maximale des écarts relatifs de positionnement outil/pièce entre le positionnement réel et le positionnement idéal (i.e. nominal) » selon l'ISO 230-1, 2012. Autrement dit, c'est l'écart relatif maximal en position et en orientation de l'effecteur (outil) par rapport à la pièce, exprimé dans l'espace pièce. Cette exactitude volumétrique à 6 composantes : 3 composantes de position et 3 composantes d'orientation.

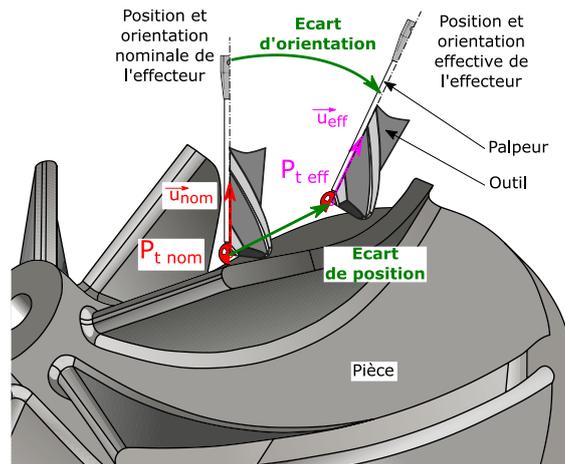


Figure 3 : Ecart volumétrique.

La norme ISO 230-1, 2012 spécifie le critère de performance volumétrique d'une Machine-Outil (exactitude volumétrique) par la capacité d'une machine-outil à réaliser les fonctions multi-axes voulues dans tout le volume de travail de la machine ou dans un plus petit volume, comme convenu entre le fabricant/fournisseur et l'utilisateur.

Quelles que soient les positions de l'effecteur (outil) et de la pièce dans le volume de travail, il est possible de définir localement une erreur volumétrique notée V_{XYZ} (dans le cas d'une structure 3 axes). Cette erreur volumétrique V_{XYZ} , par analogie à l'exactitude volumétrique, peut être définie comme l'erreur relative entre la position et l'orientation effective et nominale de l'outil par rapport à la pièce pour un positionnement outil/pièce donné. Si elle est exprimée pour une structure 5 axes [w C' B' X' b Y Z (C1) t] selon les conventions ISO 841, 2004 et ISO 10791-6, 2014, cette erreur volumétrique pourrait être notée V_{CBXYZ} .

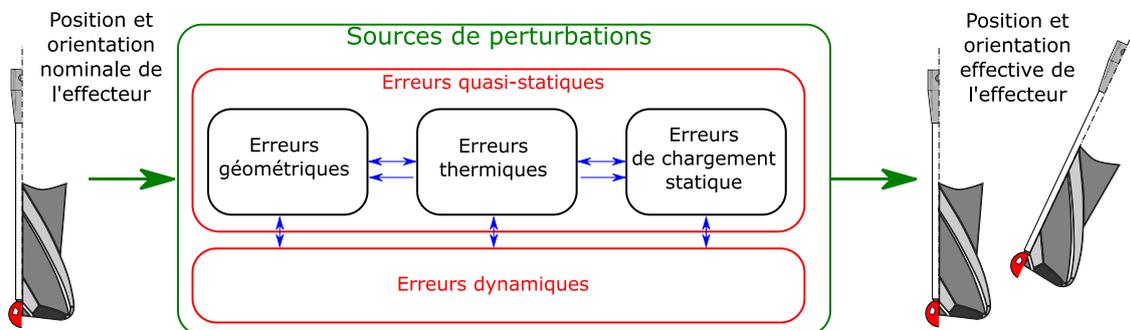


Figure 4 : Sources d'erreur volumétrique.

Objectifs de la thèse

Le processus d'élaboration de pièces mécaniques, en particulier de forme complexe, malgré sa simplicité apparente, est une succession d'activités communicantes par un transfert d'informations et qui sont en réalité complexes. Cette complexité ne permet pas une totale maîtrise du processus. La maîtrise non totale est due à des sources d'écarts présentes sur l'ensemble du processus réduisant la capacité à maîtriser la géométrie de pièce finie vis-à-vis de l'objectif initial à l'issue de la définition d'un besoin. La mesure du produit permet de statuer sur l'écart entre le réel et le besoin, par rapport à des tolérances spécifiées dans le cahier des charges.

Le progrès technologique, permet d'intégrer des systèmes de mesure avec une exactitude accrue directement en ligne (vision, sans contact, tactile) dans une machine-outil multi-axes (MOMA), de la même façon qu'une machine à mesurer tridimensionnelle (MMT), l'exactitude et environnement régulé en moins. Cela répond aux besoins industriels en termes d'automatisation de la mesure en ligne, comme spécifié dans l'industrie du futur (Industrie 4.0). Cette approche est actuellement limitée à des pièces de forme simple, et peut se concevoir avec une double finalité, (1) rendre la MOMA mesurante en garantissant la traçabilité des mesures et avec un niveau d'incertitude compatible avec les tolérances visées et/ou (2) améliorer ses performances vis à vis de tolérances réduites. Néanmoins, les conditions particulières de mesure sur MOMA (erreur volumétrique, température de la pièce usinée, effet du bridage, propreté des surfaces) impactent directement le choix des outils de mesure et la stratégie à employer (Figure 4).

A l'état actuel, hormis quelques mesures réalisées sur des caractéristiques simples (exemple diamètres) il n'existe pas de procédure capable de corriger en temps quasi réel une machine réalisant une opération de mesure à l'exception des travaux initialement menés dans [1] et dans le cadre du [projet ANR JCJC INTEGRATION](#) et [projet CAPTURE5](#). Ces difficultés sont renforcées par la complexité structurelle des MOMA à commande numérique concernées par ce projet, pour réaliser des produits complexes dans des milieux non maîtrisés.

En conséquence pour obtenir un niveau d'exactitude de mesure donné sur une MOMA il est nécessaire de développer, en plus, des procédures d'étalonnage spécifiques à ce type de machine dont la mise en œuvre puisse être réalisée aisément dans le flot de production. Il a donc été décidé, dans ce projet, de recourir à des étalons matériels complexes adaptés aux besoins spécifiques qui après mesure par la machine permettront de corriger ses défauts géométriques et de comportement.

Les activités à développer dans le cadre de cette thèse sont organisées comme suit :

- Recensement, étude et modélisation des erreurs géométriques d'une MOMA, et développement d'un jumeau numérique intégrant les résidus de correction. Le jumeau numérique sera complété ensuite, en intégrant des fonctions supplémentaires basées sur une modélisation thermo-élasto-géométrique pour décrire les erreurs de type mécanique, thermique, vibratoire, etc.
- Définition et développement d'un étalon matériel original de forme complexe permettant de mettre en évidence les erreurs géométriques d'une MOMA dans différentes configurations dynamiques et thermiques tout en assurant la fonction de traçabilité. L'étalon sera raccordé à la définition du mètre SI par l'intermédiaire d'une MMT traçable. Une incertitude de mesure sera associée à l'étalon matériel.
- Etude expérimentale basée sur l'exploitation de l'étalon matériel de forme complexe afin d'évaluer les fonctions adoptées pour l'élaboration d'un jumeau numérique, et investigation des limites atteignables par cette approche proposée (limite pratique de correction liée aux incertitudes de mesure, au processus de coupe, à la reproductibilité de la machine, etc.).

- Etude expérimental des erreurs géométriques de la MOMA en utilisant un deuxième système de mesure optique externe de type laser-tracer en mode dynamique. Cette étude demande en premier temps l'implémentation d'un interfaçage CN- LASER TRACER, et est complétée par l'enrichissement du modèle de correction développé dans [CAPTURE5](#). Une comparaison des résultats expérimentaux sera menée et suivi par une évaluation des incertitudes.
- L'identification du comportement élasto-géométrique pour décrire le comportement structurel en cours de process d'usinage ou de mesure.

La thèse proposée s'inscrit dans le cadre de l'EURAMET via le projet [EMPIR 23IND12 ADAM](#) : *Application of Digital-Metrological Twins for emerging measurement technology in advanced manufacturing*

Date de début : 01/09/2024

Durée : 36 mois

Lieu d'exercice :

La thèse se déroulera essentiellement sur le campus ENSAM de Cluny (71) au LaBoMaP ainsi que quelques périodes courtes au LNE de Paris et LURPA de l'ENS Paris-Saclay. Le cadre du projet européen permettra des échanges scientifiques avec le consortium du projet ainsi que des déplacements en Europe sur la période de thèse.

Contacts :

- Hichem Nouira, Professeur, [Laboratoire Commun de Métrologie, LNE-Cnam](#)
hichem.nouira@lne.fr
- Nabil Anwer, Professeur, [LURPA – équipe Geo3D, ENS Paris Saclay](#)
nabil.anwer@ens-paris-saclay.fr
- Fabien Viprey, Maître de Conférences, [LaBoMaP – équipe UGV, Arts et Métiers Cluny](#)
Fabien.viprey@ensam.eu

Références :

- [1] Viprey, F. (2016) Modélisation et caractérisation des défauts de structure de machine-outil 5 axes pour la mesure in-process », Thèse, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [2] Prévost, D. (2011). Modélisation avancée du couple Machine-Outil / Commande Numérique dans un contexte UGV pour l'optimisation du calcul de trajectoires multi axes. Thèse, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [3] Lavernhe, S. (2006). Prise en compte des contraintes associées au couple MO-CN en generation de trajectoires 5 axes UGV. Thèse, École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan.
- [4] S. Moustafa, N. Gerwien, F. Haertig, and K. Wendt, "Comparison of error mapping techniques for coordinate measuring machine using the plate method and laser tracer technique," XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology, pp. 2457-2461, 2009.

- [5] J-M Linares and al, Impact of measurement procedure when error mapping and compensating a small CNC machine using a multilateration laser interferometer, *Precision Engineering* 38 (2014) 578–588
- [6] S. Xiang, Yusuf Altintas, Modeling and compensation of volumetric errors for five-axis machine tools, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 101 (2016) 65–78
- [7] R. Schmitt, M. Peterek, Traceable measurements on machine tools – thermal influences on machine tool structure and measurement uncertainty, *Procedia CIRP* 33 (2015) 576 – 580
- [8] S. Ibaraki, M. Sawada, A. Matsubara, and T. Matsushita, “Machining tests to identify kinematic errors on five-axis machine tools,” *Precision Engineering*, vol. 34, no. 3, pp. 387-398, 2010.
- [9] ALTINTAS, Yusuf, BRECHER, Christian, WECK, Manfred, et al. Virtual machine tool. *CIRP annals*, 2005, vol. 54, no 2, p. 115-138.
- [10] J. Gu, J. Agapiou, S. Kurgin, CNC machine tool work offset error compensation method, *Journal of Manufacturing Systems* 37 (2015) 576–585
- [11] K.-I. Lee, and S.-H. Yang, “Measurement and verification of position-independent geometric errors of a five-axis machine tool using a double ball-bar,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 70, pp. 45-52, 2013.
- [12] T. Erkan, J. R. R. Mayer, and Y. Dupont, “Volumetric distortion assessment of a five-axis machine by probing a 3D reconfigurable uncalibrated master ball artefact,” *Precision Engineering*, vol. 35, no. 1, pp. 116-125, 2011.
- [13] S. Ibaraki, Y. Ota, A machining test to calibrate rotary axis error motions of five-axis machine tools and its application to thermal deformation test *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 86 (2014) 81–88