



HAL
open science

Amélioration de performance par l'analyse de tests de qualification machine

François Geiskopf, Emmanuel Caillaud, Joël Koenig

► **To cite this version:**

François Geiskopf, Emmanuel Caillaud, Joël Koenig. Amélioration de performance par l'analyse de tests de qualification machine. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-03362474

HAL Id: hal-03362474

<https://hal.science/hal-03362474>

Submitted on 1 Oct 2021

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.

Amélioration de performance par l'analyse de tests de qualification machine

Joël Koenig, François Geiskopf & Emmanuel Caillaud

INSA de Strasbourg
Laboratoire de Génie de la Conception
24 boulevard de la victoire 67084 Strasbourg
{{firstname.name}}@insa-strasbourg.fr

Résumé :

Notre réflexion porte sur une alliance franco-asiatique de production de machines-outils à commande numérique au sein de laquelle des dégradations de performance produites sont détectées en phase de qualification machine. Nous proposons une méthode d'analyse permettant de relier les effets extraits des résultats de tests de qualification à des causes correspondant à des défaillances sur le processus délocalisé, par l'intermédiaire de la procédure d'assemblage. La mise en œuvre de cette méthode est illustrée sur un exemple industriel s'appuyant sur l'exploitation des résultats de tests de circularités, qualifiant l'interpolation des axes de déplacement machine. Nous montrons que ce test doit être complété par des analyses temporelles et fréquentielles, pour faire le lien entre un effet (pic à l'inversion et déviation au contour) et ses causes (défaillance sur un processus d'assemblage délocalisé).

Abstract :

This paper relates to a French and Taiwanese joint-venture of machine-tool manufacturing which performance lacks are detected only during the qualification phase. We propose an analysis method linking the results of the qualification machine tests to the delocalized process failures, through the assembly process. Our method is illustrated by an industrial example. Some circularity tests are exposed, qualifying the interpolation of the motion axis. We demonstrate that this test must be completed by temporal and frequency domain analysis. Overshoot and profile deviation are linked to a failure occurred during the assembly process.

Mots-clefs : Système de production, évaluation de performances, qualification machine.

1 Introduction

Le champ des activités industrielles porté à l'échelle mondiale, inscrit des stratégies nouvelles de production et remettent en cause certains principes organisationnels, Hatchuel *et al.* (2002). Au cœur d'une telle dynamique les entreprises doivent composer avec un certain nombre de paradoxes : local vs global (ressources matérielles, immatérielles, humaines et financières). Ce type particulier de coopération synchrone distribuée, Grundstein (2002), correspond au mode le plus contraignant. En effet la communication (données, informations) et la prise de décision (autorité, application) se conjuguent en temps réel avec des acteurs (connaissance, compétence) géographiquement distribués.

La matière de cet article provient de données empiriques relevées dans le cadre d'une thèse de convention industrielle de formation par la recherche sous l'égide de l'association nationale de recherche et de technologie, menée depuis octobre 2005 avec la société Huron Graffenstaden et le LGÉCO. La société française, créatrice de machines outils, produit des centres d'usinage et de fraisage grandes vitesses. Pour avoir accès à un marché plus large et dans une logique de low cost, l'entreprise a mis en place une joint-venture avec une entreprise basée à Taiwan. L'objectif industriel consiste à organiser une réflexion continue sur la quantification des coûts de non-

qualités induits des problèmes de division du processus productif transnational. La problématique est donc d'assurer une continuité de fabrication dans un processus clairement distribué pour en finalité qualifier le centre d'usinage de performant ou de définir le complément d'activités à apporter pour atteindre ce même objectif.

L'analyse proposée relie les effets extraits des résultats de tests de qualification à des défaillances, par l'intermédiaire de la procédure d'assemblage. De l'efficacité de cette dernière, dépendent les performances du sous-système qui sont explicitées dans second paragraphe. L'exploitation des résultats se traduit par une évaluation quantitative du coût des phases nécessaires à l'amélioration du processus délocalisé, et du potentiel d'amélioration de ce même processus. Notre méthode d'analyse est décrite au paragraphe 3. La mise en œuvre de cette méthode est illustrée au paragraphe 4 par un exemple industriel s'appuyant sur les tests de circularités, qualifiant l'interpolation des axes de déplacement d'une machine-outil.

2 Evaluation de performance en phase de qualification machine

Le terme de qualification machine est marqué par un intérêt pratique : il évalue de manière immédiate la qualité d'assemblage des étapes précédentes dans le processus de fabrication de la machine. L'état de l'art montre que toutes les études du domaine de la qualification des machines-outils sont destinées à montrer le potentiel des machines ou à proposer des méthodes d'évaluation de leur performance, pour leurs utilisateurs. Les travaux proposés par Terrier *et al.* (2004) ou Schmitz *et al.* (2000) illustrent la nécessité des utilisateurs de maîtriser la méthode de qualification de la machine dans un but de maîtrise du process, au sein duquel elle est mise en œuvre. Notre étude se place plus en amont dans le cycle de vie de la machine-outil. En tant que constructeur de machines, qualifier la machine-outil a pour objectif d'évaluer la qualité de ses processus d'assemblage et de mise au point délocalisés.

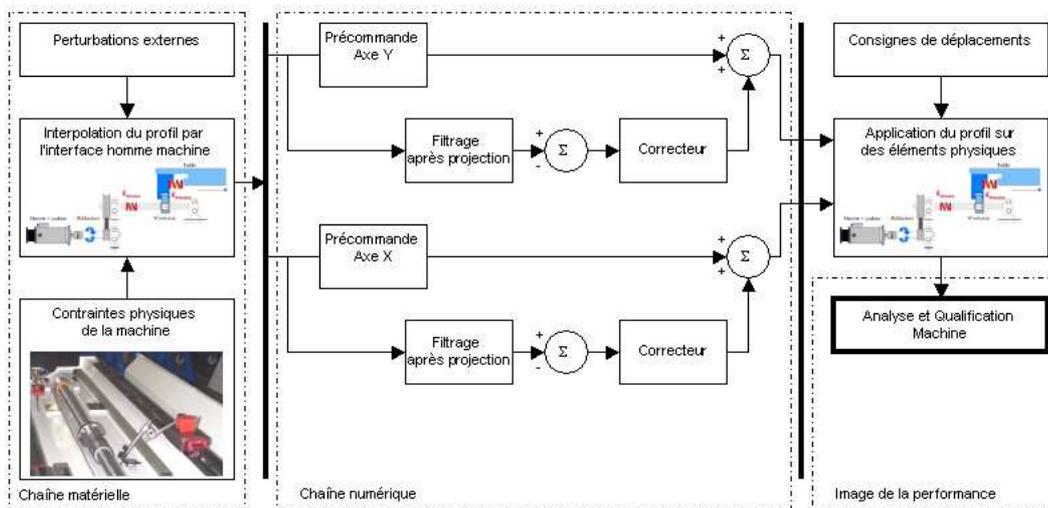


Figure 1 : Chaîne matérielle, chaîne numérique et qualification machine.

La performance globale d'une machine outil à commande numérique nécessite une chronologie de réglages, selon Bearee (2005). Cette chronologie répond à une logique de commande d'asservissement, bien avant même de parler d'interpolation d'axes David *et al.* (2004). La performance en phase de qualification machine évalue l'ensemble des paramètres utiles aux processus d'assemblages machine. La performance en phase de qualification machine n'apporte aucune validation machine au sens post processeur, programme pièce et procédés de coupe. Elle a pour objectif de donner une image de l'efficacité des opérations d'assemblage

d'éléments physiques (cf. figure 1). En effet, dans le cadre d'assemblages délocalisés, la connaissance de la géométrie machine ou des éléments d'assemblage n'est plus maîtrisée.

Le processus qui mène ou non à la qualification machine se décompose en deux types d'activités de qualification de sous-systèmes :

- Les chaînes matérielles (partie gauche de la figure 1) ou parties opératives ;
- La chaîne numérique (partie centrale de la figure 1) qui pilote la modulation d'énergie et répond aux exigences des boucles de régulations. Elle contrôle l'ensemble des axes machine et permet la génération d'un mouvement dans l'espace.

Le nombre impressionnant, selon Dessein (1997), de paramètres intervenant dans chacun de ces sous-systèmes, ainsi que les échanges d'informations pendant leur assemblage, sont des freins à la maîtrise du processus global, visant à respecter les critères de performance du produit fini.

3 Présentation de la démarche d'analyse

Comme les opérations de qualification se déroulent avant la réception du client, les méthodes basées sur l'usinage de pièces spécifiques ont été écartées, pour des raisons économiques. Nous avons appliquées les méthodes exploitant les résultats issus de mesures sur des mouvements d'interpolation sans charge. Ces tests de circularité sont reconnus à l'échelle mondiale pour déterminer la précision sur les machines outils à commande numérique. Le test de circularité se fait conformément aux normes ISO, ANSI, JIS, QS9000 et ATA. Il permet de vérifier l'ajustement des tolérances de fabrication des sous-ensembles fonctionnels, la calibration, la comparaison entre machines et un diagnostic physique de la machine en cas d'erreurs: jeu latéral, rectitude, vibration et toutes erreurs d'assemblage géométriques générales. Le tracé du test de circularité est une représentation polaire des erreurs radiales, obtenue lorsqu'un mobile parcourt une trajectoire circulaire. L'erreur radiale est obtenue en faisant la différence entre le rayon du cercle théorique et le rayon mesuré à chaque période d'échantillonnage. En un seul test, deux classes de problèmes sont identifiées, liées aux chaînes matérielles et numériques. Quatre tracés (deux concentriques en limite de tolérance et deux autres polaires en contournage horaire et anti-horaire) constituent le contrôle du ball bar. Le test de circularité n'est que la première étape, Oduguwa *et al.* (2006), du diagnostic effectué par un utilisateur de machine (figure 2). Cette étape peut se suffire à elle-même si le résultat est dans les tolérances.

En revanche si un quelconque écart est relevé (pic à l'inversion, déviation au contour, pitch...) deux tests numériques supplémentaires sont nécessaires pour séparer les problèmes d'origines physiques de ceux d'optimisations numériques. Les deux tests supplémentaires (tracés fréquentiel et temporel) sont des fonctions oscilloscope intégrées à la commande numérique, ils ne donnent pas une solution générique au couple diagnostique/résultats. Ils ne nous sont accessibles et exploitables que par notre position de constructeur, seul détenteur de l'entière plate-forme logicielle (cycles, commande numérique, programme automate source, interface homme/machine).

Les grandeurs observables sur l'oscilloscope sont illustrées par deux types de tracés (représentés en figure 4) :

- Analyse temporelle : elle met en œuvre des procédures de réglage basées sur la réponse temporelle des boucles d'asservissement. Elles permettent d'évaluer les temps de réponses du système, l'amplitude des variations de vitesse et de courant, l'amplitude du premier dépassement et la fréquence d'oscillation.
- Analyse fréquentielle : elle permet de visualiser la fonction de transfert d'une boucle de régulation à partir d'une expérimentation machine. Sa représentation passe par un tracé de bode incluant une courbe de gain (exprimée en dB) en fonction de la fréquence et

une seconde exprimant la fréquence en radian. Ces représentations montrent la marge de stabilité pour faire face aux imprécisions des axes et caractérisent les résonances mécaniques qui affectent la machine.

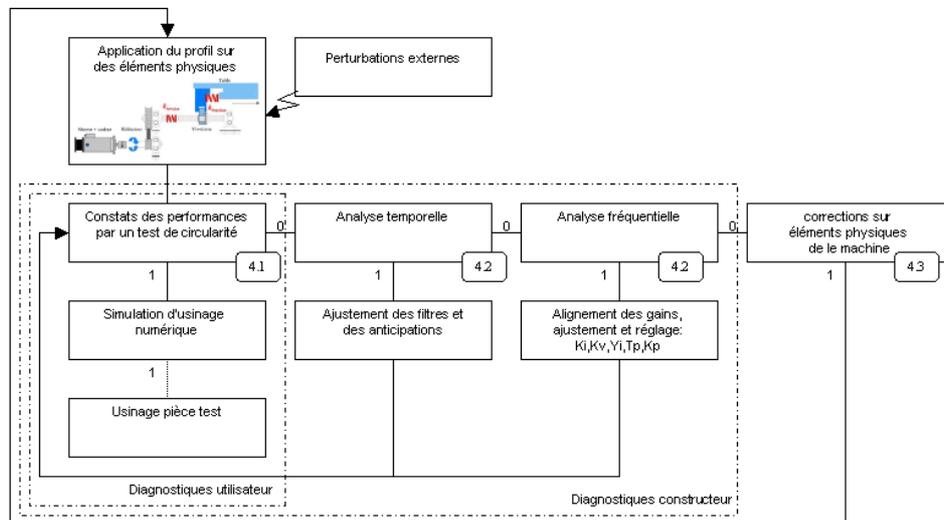


Figure 2. Modélisation du processus d'analyse de problèmes.

L'interprétation de ces trois types d'analyse conduit à des solutions numériques qui peuvent être régénérées et testées immédiatement sur le système. Toutefois, si les écarts relevés à l'issue des deux derniers tests ne peuvent être compensés numériquement. Des opérations de corrections physiques (représenté en 4.3 sur la figure 2) sont alors obligatoires, remettant en question des processus d'assemblage. Lei *et al.*(2006) fait le lien entre le test de circularité ou ball bar vu comme l'image d'une surface de sortie à une étape physique dans le processus d'assemblage machine

4 Application industrielle

Nous allons, à partir de relevés expérimentaux, isoler un couple d'axes machine présentant des problèmes manifestes, remonter de manière rétroactive jusqu'à un écart sur un processus d'assemblage du montage de la vis à billes sur un axe travail. Notre expérimentation repose sur une machine 3 axes, équipée d'une commande numérique Siemens, NCU571.4 référence constructeur 6FC5357-OBB12-OAE0 sur une PCU50 V2 XP référence constructeur 6FC5210-ODF21-2AA0. La partie entraînement d'axes est composée de :

- Cartes de régulation « High standard » Siemens : 6SN1118-ODM33 sur les axes X, Y et Z, 6SN1118-ODM31 sur l'axe changeur, 6SN1118-ODJ21 sur l'axe broche (18000Rpm, 10 kilowatts KESSLER)
- Moteurs Siemens : 1FK7103-5AF71-1AG3 sur les axes X et Y, 1FK7085-7AF71-1AG3 sur l'axe Z, 1FK7042-5AF71-1AE0 sur l'axe changeur

4.1 Analyse de circularité

Nous pouvons constater sur la figure 3, un pic à l'inversion à faible vitesse (partie gauche) et une déviation au contour importante à des vitesses plus élevées. Il convient de pousser l'analyse des défauts un peu plus loin grâce aux fonctions oscilloscope de la CN, afin de pouvoir définir si les défauts peuvent être compensés par de l'optimisation ou si certaines étapes du processus d'assemblage sont incriminées.

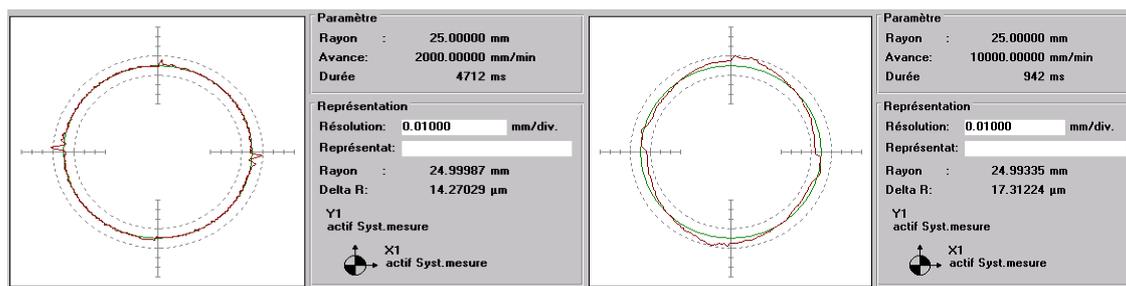


Figure 3. Résultats des tests de circularités sur les axes X et Y.

4.2 Analyse fréquentielle et temporelle du couple d'axes

La représentation spectrale de bode figure 4 (partie de gauche) retranscrit des dégradations en fréquence. L'excitation sinusoïdale propre en entrée est déphasée en sortie. Le système n'est pas stabilisé. La réponse n'est pas amortie (repère 1) limitant ainsi la tolérance aux variations paramétriques du processus à piloter (nos axes de travail). L'optimum rapidité-stabilité (repère 2) se trouve considérablement mis en question. Nous le voyons très clairement sur la mesure de la rapidité d'asservissement car la bande passante ne permet pas de répondre aux sollicitations de fréquences élevées.

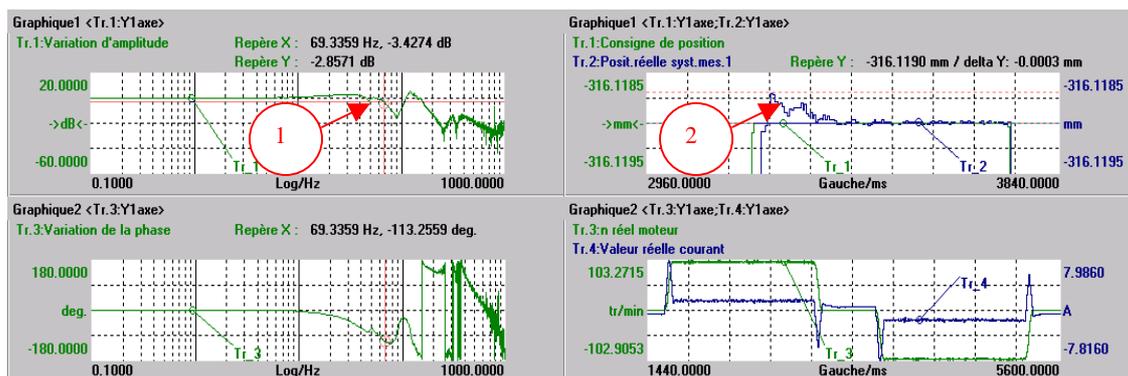


Figure 4. Analyse fréquentielle et temporelle du couple d'axes incriminés.

Les interprétations fréquentielles et temporelles précédentes font apparaître intrinsèquement des sur-oscillations. Un relevé de l'intensité (non représenté dans cette communication) sur les axes incriminés (couple X1/Y1) confirme que l'origine des écarts repose sur un vice d'assemblage et ne peut être compensée de manière numérique.

4.3 Analyse des éléments physiques incriminés

Cette analyse nécessite une autopsie de sous-système, comme une étude analytique de résolution de problèmes, Geiskopf *et al.* (2005), motivée par des experts métiers. De manière empirique, les erreurs suivantes ont été diagnostiquées dans le sous-ensemble représentatif du processus de montage de vis à billes :

- Sur l'axe Y, trois roulements à cages obliques du palier arrière, situés côté moteur sont montés à l'envers. La dépose du palier arrière (côté moteur) de la vis à billes montre que le montage des roulements à contacts obliques n'est pas effectué par paire en tête bêche.
- La précontrainte de la vis n'a pas été respectée sur le palier avant. Les rondelles de mise en précontrainte ne sont pas assemblées dans un ordre cohérent.

- La rectification de la bride n'est pas dans les tolérances (prescription constructeur : côte+0,02mm de sur-épaisseur). De plus cette bride de fixation n'a pas été rectifiée mais a subi une opération de tournage.

Le mode opératoire ne donne qu'une vision analytique au sens où il ne répond qu'à un éclairage sur les objets élémentaires de la structure du processus d'assemblage. Ce qui serait en revanche intéressant serait l'étude du résultat du processus incriminé, l'implexe au sens de Le Moigne, (1999), mais ce dernier ne s'étudie qu'au travers du prisme de la systémique.

5 Conclusion

Estimer la performance machine c'est connaître sa géométrie d'assemblage et les principaux sous-systèmes. Pour des transferts de technologie à l'international, il faut répondre à une continuité de qualité dans le temps et l'espace géographique. Ces exigences sont techniquement contradictoires. La performance en phase de qualification machine évalue donc l'ensemble des paramètres utiles aux processus d'assemblages machine. Lors de la qualification, trois tests successifs sont mis en œuvre, ils ont pour objectif d'identifier d'éventuelles erreurs sur la géométrie de la machine. L'interprétation des résultats de ces tests conduits à des pistes de corrections numériques ou physiques. Grâce à des tests de circularités déclinés suivant les trois modes d'analyse, nous proposons une passerelle entre un élément d'architecture cible (couple d'axes machine X/Y) et un critère de performance affecté au processus d'assemblage défectueux. Mais modélisé de manière analytique la procédure d'assemblage répond d'avantage à la question de la composition du processus qu'à la question de l'interaction du processus sur la machine. Une modélisation systémique des sous-ensembles machine permettrait d'élaborer une matrice structurelle sur l'identification de tous les processeurs de fabrication de la machine.

Références

- Bearee, R., 2005. Prise en compte des phénomènes vibratoires dans la génération de commande des machines outils à dynamique élevée, Thèse de Doctorat, ENSAM, Lille.
- David, J.-M., Leleu, S., Diolez, G. & Roux, T., 2004. Evaluation de la géométrie des machines: présentation d'une méthode innovante, rapport interne, ENSAM, NIMES.
- Dessein, G., 1997. Qualification et optimisation de la précision d'une machine-outil à commande numérique, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- Geiskopf, F., Goepf, V. & Kieffer, f., 2005. Modèles et conception intégrée des systèmes de production orientés procédés, 17^{ème} Congrès Français de Mécanique, Troyes.
- Grundstein, M., 2002. De la capitalisation des connaissances au renforcement des compétences dans l'entreprise étendue, GCC-GI02, Nantes.
- Hatchuel, A., Le Masson, P. & Weil, B., 2002. The new context from knowledge management to design-oriented organisations. *International Social Science Journal*, 54(171): 25-37.
- Le Moigne, J.-L., 1999. La Modélisation des systèmes complexes. *Sciences des Organisations*, 1. Dunod, Paris.
- Lei, W.T., Sung, M.P., Liu, W.L. & Chuang, Y.C., 2006. Double ballbar test for the rotary axes of five-axis CNC machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, In Press, Corrected Proof.
- Oduguwa, V. & Roy, R., 2006. A review of rolling system design optimisation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(7-8): 912-928.
- Schmitz, T. & Ziegert, J., 2000. Dynamic evaluation of spatial CNC contouring accuracy. *Precision Engineering*, 24(2): 99-118.
- Terrier, M., Dugas, A. & Hascoet, J.-Y., 2004. Qualification of parallel kinematics machines in high-speed milling on free form surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(7-8): 865-877.