

Nouvelle méthode pour la détection du contact outil-pièce dans les machines outils

V. BOURNY^{a,b}, T. CAPITAINÉ^{a,b}, A. LORTHOIS^b, F. SWINGEDOUW^b, B. DOS SANTOS^c

a. *Laboratoire Modélisation, Information & Systèmes (MIS, EA 4290), Université de Picardie Jules Verne (UPJV), Faculté des Sciences, 7 rue du Moulin Neuf, 80000 AMIENS*

b. *Institut Supérieur des Sciences et Techniques (INSSET), UPJV, 48 Rue Raspail, 02100 SAINT-QUENTIN*

c. *Plateforme Technologique Innovaltech, Lycée Condorcet, Rond-Point Joliot Curie, 02100 SAINT-QUENTIN*

Résumé :

Ce travail présente une nouvelle méthode pour détecter le contact entre l'outil et la surface de la pièce usinée dans les opérations d'usinage à grande vitesse. Cette méthode, fondée sur la mesure de variation des impédances électriques lors de ce contact, est implantée dans un système embarqué. Son principal avantage est sa capacité à fonctionner en mode dynamique de la broche (à haute vitesse) c'est-à-dire dans les conditions d'usinage, et en s'affranchissant d'un palpeur.

Abstract :

This work presents a new method to detect contact between the tool and the surface of the workpiece in machining operations at high speed. This method, based on measuring changes in electrical impedance during the contact, is implanted in an embedded system. Its main advantage is its ability to operate in dynamic mode of the spindle (high speed) that is to say, in the machining conditions, and freeing itself from a probe.

Mots clefs : UGV, contact outil-pièce, spectroscopie d'impédance, microprocesseur DSP

1 Contexte de l'étude

Dans le domaine des opérations d'usinage de pièces, l'Usinage à Grande Vitesse (UGV) constitue un procédé d'avenir innovant et performant. En effet, la diminution des temps de fabrication et l'amélioration de la qualité de la pièce se trouvent au premier plan de ce procédé. L'UGV permet de gagner en flexibilité tout en garantissant la productivité. C'est pourquoi, il est nécessaire d'optimiser cette technique de production et d'appliquer de nouvelles procédures pour fiabiliser le processus d'usinage, garantir la qualité géométrique des surfaces usinées (état de surface et précision dimensionnelle), assurer la productivité et enfin renforcer la sécurité des opérateurs [1]. Cet article se propose de décrire une nouvelle procédure dans les procédés d'UGV.

La mesure de l'outil coupant est une étape fondamentale dans le procédé d'usinage. Cela permet à la Commande Numérique (CN), d'une part de faire coïncider le point de départ de la pièce avec le bout de l'outil, et d'autre part, d'inclure les données exactes de la géométrie de l'outil dans les calculs de déplacements d'axes (adaptation des points de pivots...). Cette étape est donc nécessaire à chaque changement d'outil ou pour prendre en compte une usure de l'outil. Elle engendre des temps morts machine et l'utilisation d'un système tierce (palpeur, ...) introduit des incertitudes. Elle comporte de nombreux inconvénients :

- utilisation d'un palpeur d'outil et non de l'outil usineur : présence d'une dispersion de la mesure; perte de temps car retour au magasin d'outils changement d'outils, mesure d'outil..... puis reprise de passe;
- incertitude de la mesure de l'outil;
- dilatation de l'outil;
- mesure de l'outil par un palpeur outil qui introduit un décalage relatif du centre outils par rapport au nez de broche;
- précision de la commande numérique;
- mesures réalisées en mode statique : elles ne sont pas faites dans les conditions d'usinage (vitesse de rotation de l'outil, température, dilatation, ...).

De ces inconvénients apparaissent des problèmes de tolérance de la pièce usinée. Cette pièce sera alors mise au rebut ou dans le meilleur des cas elle devra être rectifiée. Cette procédure de mesure d'outil est également utilisée lors de la détection de défauts. Ces défauts sont multiples : chocs de l'outil sur la pièce, usure de l'outil, bris d'outils, pièce à retoucher.... Prenons l'exemple d'un changement d'outil. L'ensemble des opérations nécessaires (démontage, installation, mesure, mise en broche, origine, reprise) induit une grande dispersion de la mesure, ce qui affecte alors la qualité de la pièce usinée. Quand la pièce présente des défauts, il est nécessaire d'éviter la dispersion entre deux usinages : c'est là toute la problématique de reprise d'usinage. Cela nécessite une méthode de détection du premier contact entre l'outil et la pièce : c'est ce qu'on nomme l'accostage.

L'accostage de la pièce doit être garanti avec l'outil tournant et en tenant compte des déplacements axiaux de la broche générés par la fréquence de rotation (régime dynamique). Une telle détection n'existe pas sur le marché. A notre connaissance, la bibliographie est peu riche dans ce domaine. Quelques brevets ont bien été proposés comme par exemple [3-6]. [3] propose de mesurer le courant électrique traversant le contact entre l'outil et la pièce à usiner appliqué en particulier aux machines à décolleter. [4] propose de mesurer la variation d'amplitude d'un signal électrique haute fréquence ou d'un signal acoustique. [5] propose d'appliquer une tension continue et d'allumer une lampe ou d'émettre un son lors du contact outil-pièce. [6] propose pour les machines de marquage une détection du contact par conduction électrique.

Cet article présente une nouvelle méthode pour détecter le contact outil-pièce dans les machines outils et notamment les UGV. La première partie décrit les résultats des expérimentations validant l'exploitation de la variation d'impédance électrique pour la détection du contact outil pièce. La deuxième partie spécifie la nature des signaux électriques à gérer et leur traitements associées qui sont intégrés dans un système embarqué spécifiquement développé à cet effet.

2 Détection du contact outil-pièce par variation d'impédance

2.1 Principe

Ce travail est basé sur le résultat de deux études expérimentales et de faisabilité [7-9]. L'objectif était d'innover dans la détection du contact de l'outil d'usinage d'un UGV sur la pièce à usiner à la vitesse de travail de la broche (entre 20 000 et 30 000 *tr/min*) dans le cadre de la reprise d'usinage en super finition. L'innovation proposée est fondée sur cette variation significative de l'impédance électrique lorsque l'outil touche la pièce. Ces études ont été menées sur un UGV de marque HURON, modèle K2X8 FIVE, mis à disposition par la PFT Innovaltech [10]. C'est une machine électrobroche 5 axes avec *roulements en céramique*. Elle est équipée d'une broche KESLER dont la vitesse de rotation peut atteindre 30 000 *tr/min*. Selon le procédé de conduite de l'outil, le circuit de pilotage de la broche amène l'outil au voisinage immédiat de la pièce (typiquement de l'ordre du dixième de millimètre entre la position théorique de l'origine de la pièce et la pointe de l'outil). Ensuite, le reste de la course se fait par très petits pas vers la position d'origine réelle. La précision de cette position est donc celle du pas choisi de la CN, c'est-à-dire typiquement de l'ordre du micromètre. Lorsque l'outil touche la pièce, une variation significative du module de l'impédance électrique est observée. Cette dernière est observée à la fois en régime statique (rotation nulle de la broche) et en régime dynamique (rotation non nulle de la broche).

2.2 Résultats expérimentaux

D'un point de vue électrique, nous pouvons modéliser le centre d'usinage par trois dipôles d'impédances électriques complexes Z_{ST} , Z_{TW} et Z_{WM} de la machine-outil (figure 1), telles que :

- Z_{ST} : impédance entre le corps électrobroche et la broche,
- Z_{TW} : impédance entre l'outil et la pièce. Z_{TW} est une lame d'air d'épaisseur z . Les différentes mesures expérimentales ont montré que Z_{TW} est une impédance très grande avant l'accostage et est négligeable après l'accostage,
- Z_{WM} : impédance entre la pièce et le plateau tournant. Le corps de l'électrobroche est isolé du plateau tournant par une plaque d'époxy. Z_{WM} se modélise par un condensateur idéal de capacité $C_{isolant}$.

Une tension alternative U_e (tension d'entrée) de fréquence variable f est appliquée aux bornes de l'impédance électrique Z_{WM} (figure 1). La tension résultante U_s (tension de sortie) est mesurée aux bornes de la résistance de mesure R_s . A l'accostage, l'impédance électrique Z_{WM} est mise en parallèle avec l'impédance électrique Z_{ST} . Ainsi une variation d'impédance électrique est observée. Cela se traduit par une chute de la tension U_s .

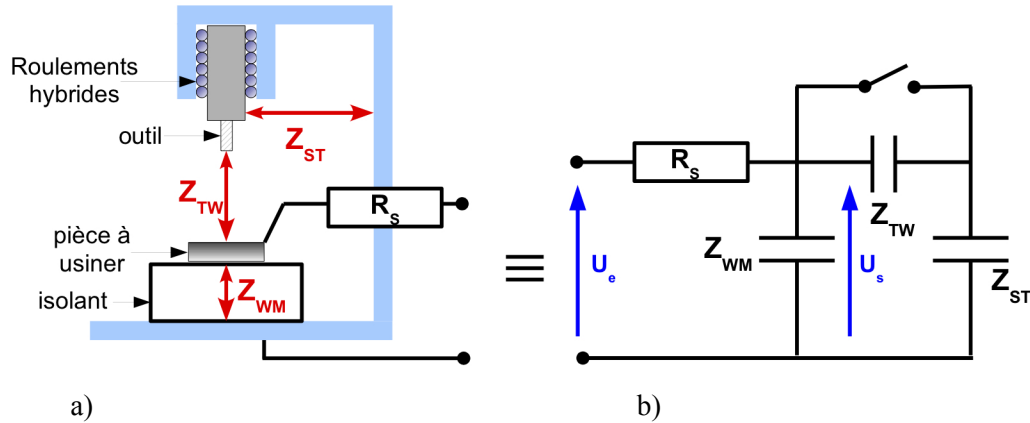


FIG. 1 – Modélisation de la machine-outil avec les impédances électriques correspondantes (a) et son équivalence électrique (b). L'interrupteur caractérise l'accostage outil-pièce.

Ces différentes impédances électriques ont été caractérisées par spectroscopie d'impédance [11, 12] (à l'aide d'un analyseur d'impédance électrique *AGILENT E4980A 20Hz-2MHz*) en régime statique (vitesse de rotation nulle, $\Omega = 0$) puis en régime dynamique (vitesse de rotation non nulle, $\Omega \neq 0$).

La figure 2 présente un résultat expérimental caractéristique de la variation d'impédance électrique à l'accostage. Lors de la conduite de l'UGV, l'électrobroche est amené vers la pièce par l'opérateur par pas de la CN (de l'ordre du micromètre). A basse fréquence une variation significative du module de l'impédance est observée à l'accostage : avant l'accostage nous mesurons $|Z| \approx 5300 \Omega$ puis à l'accostage $|Z| \approx 500 \Omega$ soit un rapport de 10. Ce rapport dépend de la fréquence f .

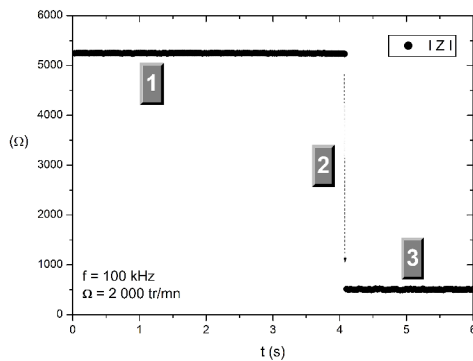


FIG. 2 – Variation du module d'impédance électrique Z à la fréquence de travail $f=100\text{kHz}$ en fonction du temps. La vitesse de l'électrobroche est de $\Omega=2000 \text{ tr/min}$. 1) descente de l'électrobroche, 2) variation d'impédance à l'accostage, 3) accostage.

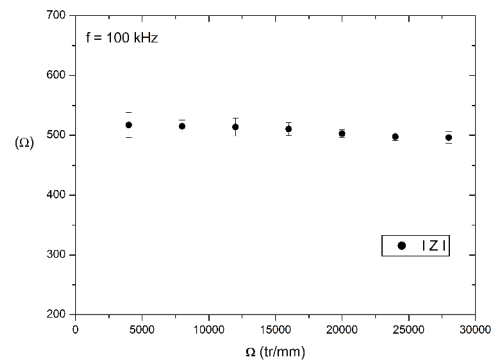


FIG. 3 – Module de l'impédance électrique Z à la fréquence de travail $f=100\text{kHz}$ à l'accostage pour différentes vitesses de rotation de l'électrobroche Ω .

Une étude expérimentale et systématique a été réalisée en fonction de la rotation de la broche Ω , figure 3. La même signature électrique de l'accostage est observée quelque soit la rotation de la broche ($\Omega \neq 0$). la variation d'impédance électrique à l'accostage est indépendante de la vitesse de rotation de l'électrobroche. Ce point est particulièrement intéressant pour obtenir une méthode générique.

L'ensemble des résultats expérimentaux ont permis de définir ce nouveau principe d'accostage de l'outil et de la pièce. La cible applicative de ce travail est la conception et la réalisation d'un système embarqué pour la détection de l'accostage entre l'outil et la pièce à usiner.

3 Aide de la détection de l'accostage par un système embarqué

Lors de l'accostage, les signaux électriques sont bruités. Ce bruit électrique est dû au bruit mécanique affectant inmanquablement la broche en rotation. Les premiers résultats indiquent que le bruit est un bruit blanc. Quelles que soient l'origine et le type spécifique de ce bruit, sa présence implique de définir et de mettre en place un traitement du signal approprié pour s'en affranchir. Ce traitement est basé sur l'intercorrélation : on échantillonne régulièrement la tension aux bornes du dispositif, puis on calcule le

produit de corrélation entre le signal émis U_e et le signal U_s mesuré pendant une durée correspondant à la période de mesure. Nous utilisons la forme discrète de la fonction d'intercorrélation $C_{U_e U_s}$ [13] entre les signaux U_e et U_s sur une fenêtre glissante de largeur T , correspondant à N échantillons. Nous avons

$$C_{U_e U_s}(k) = \sum_{i=0}^{N-1} U_e(i) U_s(i+k) \quad (1)$$

En raison d'un déphasage négligeable entre U_e et U_s alors la plus grande similitude entre les deux signaux est pour $k=0$. Le résultat de ce calcul permet de détecter de façon fiable la variation d'impédance lors du contact de l'outil même en présence de bruit important. La fréquence f du signal généré et le seuil de détection de la variation d'impédance sont paramétrables. Un premier prototype électronique a été conçu et réalisé afin de valider le principe de détection de l'accostage [8, 14]. Celui-ci a permis de valider la méthode de détection de l'accostage, l'algorithme de traitement et de le tester en condition réelle par une série d'accostage outil-pièce en statique et en dynamique avec succès.

Dans ce travail, nous présentons une version évoluée de ce premier prototype : un système embarqué prenant en compte les spécifications de l'opérateur de l'UGV. L'objectif est d'aboutir à un prototype industriel de la détection de l'accostage afin de constituer une aide à l'opérateur pour l'étalonnage des outils, de la pièce et de la reprise d'usinage. La figure 4 présente le schéma fonctionnel du système embarqué. Il est composé de deux modules : le module "capteur" et le module "télécommande". Le module "capteur" détecte l'accostage. Le module "télécommande" permet à l'opérateur de commander/paramétrer le module "capteur". La fonction principale de ce module est de l'avertir de l'accostage lors de la conduite de l'UGV. Une communication sans fil de type Zigbee permet le dialogue entre ces deux modules.

Les principaux éléments du module "capteur" sont les suivants :

- le micro contrôleur utilisé est un DSP 30F4011 de chez microchip [15, 16]. Il a été programmé pour générer U_e un signal carré grâce au moyen d'une fonctionnalité MLI (modulation de largeur d'impulsion) de fréquence f paramétrable (de $1kHz$ à $10kHz$) et effectuée, de manière périodique, la mesure de la tension U_s aux bornes du dispositif (conversion A/D). Ce DSP calcule le produit de corrélation, équation (1) entre le signal émis U_e et le signal mesuré U_s pendant une durée correspondant à la période de mesure (réglable). Le résultat de ce calcul nous permet de récupérer et de transmettre à l'opérateur (ou l'automate) le résultat de détection de contact. Une entrée analogique est également utilisée pour mesurer la température à l'intérieur du module afin de garantir le bon fonctionnement de la batterie;
- un port série est émulé via un port USB. Ce port permet de paramétrer le micro-contrôleur (par exemple la fréquence f), de faire du diagnostic et du débogage au travers d'un menu intégré au SE communicant avec un terminal série en mode texte (console Hyperterminal par exemple);
- un module de communication sans fil Zigbee (composant Xbee) permet le dialogue entre ce module et le module "télécommande";
- une batterie (6V–2A/h) rend autonome le module "capteur". Un circuit électronique spécifique permet le rechargement de la batterie;
- un capteur de température, piloté par le micro-contrôleur, est utilisé pour contrôler la température à l'intérieur du boîtier étanche où est confiné ce module.

Les principaux éléments du module "télécommande" sont les suivants :

- un micro-contrôleur, identique à celui du module "capteur", gère l'ensemble des fonctionnalités. Il a pour fonction de paramétrer les différentes configurations que l'utilisateur choisit;
- des boutons switch permettent à l'opérateur de piloter le module "capteur" :
 - un switch On/Off lance les mesures une fois que toutes les configurations ont été effectuées;
 - un switch Alim/Temp renseigne l'opérateur sur le niveau de charge des batteries ou sur la température du module "capteur".
- un module Xbee équivalent à celui de la partie "capteur". Ce support de communication permet l'envoi de trames dédiées : réveil ou mise en sommeil du module "capteur", réception du résultat contact/contact...;
- un afficheur OLED, piloté par la liaison SPI du micro-contrôleur, renseigne l'opérateur d'un ensemble d'informations (température, niveau de charge de la batterie,...). L'information principale est d'indiquer l'accostage;
- des LED renseignent du bon fonctionnement des modules et également de l'accostage (cela donne une redondance de l'information principale pour l'opérateur).

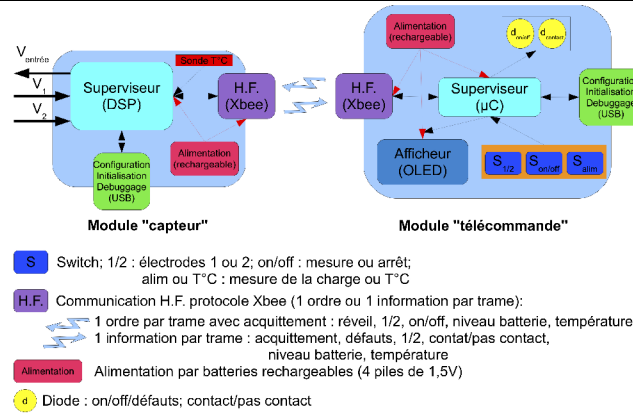


FIG. 4 – Schéma fonctionnel du système embarqué. Celui-ci est composé de deux éléments : l'un pour le capteur d'accostage et l'autre pour l'opérateur.

La figure 5 présente le système embarqué opérationnel conçu et réalisé à partir du schéma fonctionnel de la figure 4.

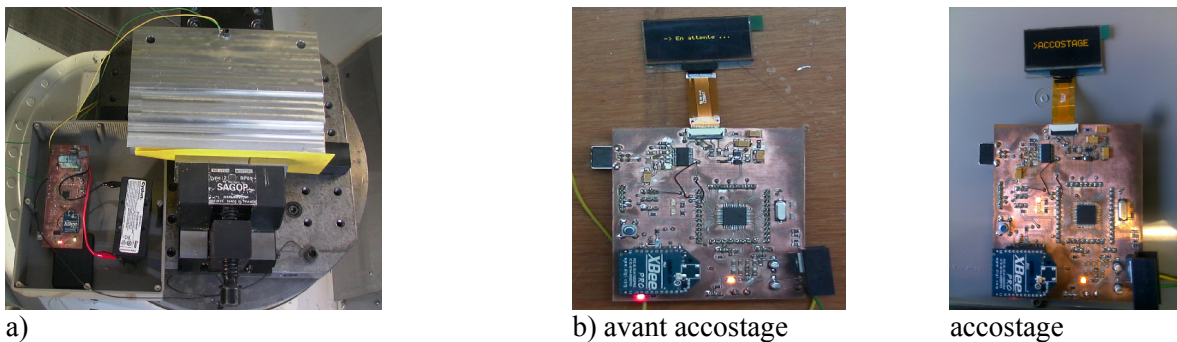


FIG. 5 – Le système embarqué constitué du : a) module "capteur" b) module "télécommande".

La carte électronique du module "capteur" est confinée dans un boîtier normalisé d'indice de protection *IP66* (étanche aux jets d'huile, copeaux...) et intégrée à l'UGV. Celle du module "télécommande" est dans un boîtier de type télécommande. Des essais ont été réalisés en conditions réelles. Une série d'accostage a été testée et à chaque fois nous détectons le contact entre l'outil et la pièce. La figure 6a présente les échantillons mesurés de U_s par le système embarqué. La vitesse de la broche est de $\Omega=2\ 000\ tr/min$. La composante bruitée apparaît clairement à l'accostage. La figure 6b présente le résultat de l'algorithme du SE (cf. équation 1). Pour cette application, nous utilisons les valeurs suivantes : $f=10kHz$ et $N=4$. Le calcul est réalisé en $T=100\mu s$. Ainsi nous obtenons une haute précision dans la détection du contact outil pièce, typiquement de l'ordre de la CN de la machine-outil. Dans nos essais sur l'UGV 5 axes de la PFT Innovaltech, nous avons une précision de l'ordre de $4\mu m$.

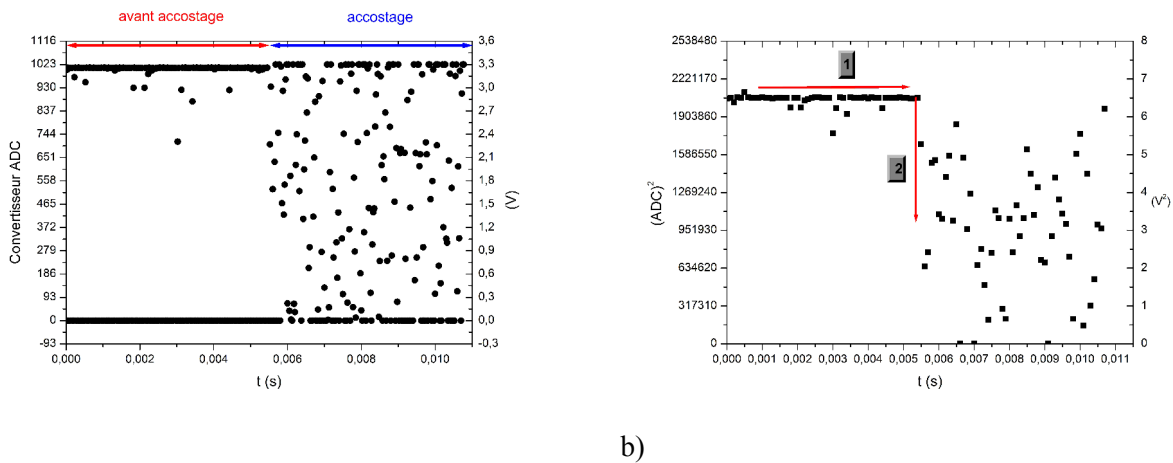


FIG 6 – a) Les échantillons de la tension U_s mesurée avant et à l'accostage en fonction du temps. Le convertisseur ADC est codé sur 10 bits (échelle de gauche), l'échelle de droite indique la correspondance en tension. L'opérateur descend la broche ($\Omega=2\ 000\ tr/min$) jusqu'à l'accostage. b) Résultat de l'algorithme du SE en fonction du temps. 1) descente de la broche, 2) variation du produit de corrélation à l'accostage.

4 Perspectives

Cet article présente une nouvelle méthode pour détecter le premier contact outil-pièce dans les machines outils et notamment les UGV. Celle-ci est basée sur les variations d'impédance électrique et d'un calcul de la fonction de corrélation. Des expériences ont démontré la capacité de la spectroscopie d'impédance pour détecter ce premier contact avec robustesse et fiabilité. Son principal avantage est sa capacité à fonctionner en mode dynamique (à haute vitesse de la broche) c'est-à-dire dans les conditions d'usinage.

Un système embarqué a été conçu, réalisé puis mis en œuvre sur un UGV. Les premiers résultats ont clairement démontré la capacité du système embarqué à détecter ce premier contact en conditions industrielles. Ce système constitue une aide à l'usineur. En effet, cette détection de l'accostage avec l'outil de travail et aux conditions d'usinage a permis à la fois d'étalonner l'outil mais également d'améliorer la reprise d'usinage. Ainsi, nous pouvons nous affranchir des procédures classiques et en conséquence des équipements associés (palpeur, ...).

L'entreprise *Forest-Liné Albert* a adapté et commercialisé cette innovation dans l'accostage outil-pièce dans la conception de leurs UGV [17]. En effet, le contexte industriel ne permet pas d'isoler la pièce de la masse commune de la machine (cf. figure 1). C'est pourquoi Forest-Liné Albert a conçu un dispositif de collecteur électrique à l'arrière de l'électrobroche, c'est la base de leur brevet [18], lequel est relié à un circuit électronique permettant de détecter le contact entre l'outil et la masse de la machine, figure 5.

Enfin, la spectroscopie d'impédance ouvre un nouveau champ d'investigation de recherche et de développement dans l'UGV [19] (voir Remerciements).

Remerciements

Les auteurs remercient le soutien de la Région Picardie et le fond Européen FEDER pour le projet de recherche ACCOST_UGV dans lequel ce travail s'inscrit. Ce projet, pour une durée de 3 ans, a débuté en octobre 2009 (2009-2012). Le travail de l'étudiant en Master 2 Systèmes Embarqués de l'INSSET, M. F. SWINGEDOUW, en collaboration avec la Plateforme Technologique INNOVALTECH est financé par OSEO Innovation Picardie.

References

- [1] : « Usinage à grande vitesse de l'aluminium et des composites – Premiers pas vers la fabrication intelligente », CETIM INFOS, N°202, mars 2008.
- [2] : DIMLA D. E., « Sensors signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations – a review of methods », D. E., International Journal of Machine Tools & Manufacture, N° 40, p. 1073, 2000.
- [3] Dufour C., "Procédé et dispositif de contrôle d'usinage sur machine-outil", brevet N° EP 0737903A2, 1996.
- [4] DIETER U., "Method and device for detecting contact between tool and workpiece fastened on processing machine", brevet N° JP2003025187, 2003.
- [5] AMBRA MAURIZIO D., "Method of detecting the position of an inner surface of a workpiece on a machine tool, and machine tool implementing such a method", brevet N° US2003033111, 2003.
- [6] GATTA R. P., "Positive piece engagement indicator for marking tool", brevet N° US7059243, 2006.
- [7] Bourny V., Capitaine T. et Senlis J., "Étude de faisabilité de la détection du contact entre l'électrobroche avec roulements en céramique et une pièce métallique lors d'une reprise d'usinage (accostage)", Contractualisation avec Forest-Liné Albert et la Plateforme Technologique Innovaltech, 2008.
- [8] Leymarie T., « Détection du point d'accostage », stage en appui de [8] dans le cadre du Master 1ère année Systèmes Embarqués de l'INSSET, 2008. www.insset.u-picardie.fr
- [9] Astier R., "Dispositif innovant pour la détection de l'accostage outil-pièce dans les procédés d'usinage à grande vitesse, stage Master 1 Systèmes Embarqués de l'INSSET, 2010. www.insset.u-picardie.fr
- [10] www.pft-innovaltech.fr
- [11] Macdonald J. R., "Impedance spectroscopy theory, experiment and applications", Town: Ed. Wiley-Interscience, 2005.
- [12] Bouzerar R., Bourny V., Capitaine T. and Senlis J., "Characterisation of the electrodynamic properties of a ceramic-based ball bearing by impedance spectroscopy", XIV International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Arras (France), (2009).
- [13] "Traitement numérique du signal", Maurice Bellanger, Sciences Sup, 8ème édition, DUNOD.
- [14] Bourny V., Capitaine T., Senlis J., Barrandon L., Lorthois A., "A new method for tool and workpiece-surface contact detection on high-speed machining process", soumis à la revue Sensors and Actuators A : Physical.
- [15] "Microchip dsPIC30F Digital signal Controllers, the best of both worlds", April 2005, ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/dsPIC30F_brochure_DS70095H.pdf
- [16] "dsPIC30F4011 device datasheet", ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/70135C.pdf
- [17] <http://www.forest-line.com/fr/news.asp>, Forest-Liné Machine Tools Worldwide News, N°10, 2010.
- [18] LESEUR J., Dépôt de brevet de l'innovation développée dans la détection de l'accostage outil-pièce, brevet N°0804491, N/Réf: F20775/EJL, 2008.
- [19] Tekaya A., Bouzerar R., Bourny V., Tekaya I., Bellenger E., Pavel J., Capitaine T., "Dynamical characterization of an industrial machine through impedance spectroscopy : linear estimation of damages", IMCIC 2010, Floride USA, 2010.