

Analyse vibratoire d'une opération de tournage

R. SERRA^a

a. Ecole Nationale d'Ingénieurs du Val de Loire, Laboratoire de Mécanique et Rhéologie E.A.2640, 3 Rue de la chocolaterie, 41000 BLOIS

Résumé :

Dans un contexte industriel où l'optimisation de la productivité est une préoccupation permanente, les ingénieurs se trouvent confrontés à des problèmes limitant leurs efforts destinés à améliorer leurs moyens de production. Le but de cet article est d'analyser les vibrations au cours d'une opération de tournage à sec de l'ensemble Machine-Outil-Pièce. Cet ensemble possède des caractéristiques dynamiques complexes. Le comportement vibratoire est influencé par de nombreux paramètres comme le matériau usiné, la sortie d'outil, la vitesse de coupe, la profondeur de la coupe et l'avance. Cela n'est pas complètement connu encore, ainsi notre but est d'en expliquer ses origines par deux approches complémentaires : l'une numérique et l'autre expérimentale. Des calculs par d'éléments finis ont été effectués afin d'identifier les propriétés dynamiques des éléments qui participent à l'usinage comme les éléments structuraux (tour, support d'outil, outil de coupe, pièce, contre-pointe, sortie d'outil...). Un plan d'expérience des paramètres de coupe (profondeur de coupe, avance et vitesse de coupe) a été utilisé et une série d'essais de tournage a été réalisée. Les résultats ont montré un effet significatif entre ces paramètres sur la rugosité de surface, la puissance consommée, le temps d'usinage, les vibrations de l'outil et enfin une meilleure compréhension du processus.

Abstract :

In an industrial context where the optimization of the productivity is a permanent concern, the engineers are confronted with problems limiting their efforts intended to improve their means of production. The aim of this article is to analyze the vibrations during an operation of dry turning of the Machine-Tool-Part unit. This unit has complex dynamic characteristics. The vibratory behavior is influenced by many parameters like machined material, the tool-overhang, the cutting speed, the depth of cutting and the feed rate. That is not completely known still, our goal is to explain its origins by two complementary approaches of them: one numerical and the other experimental one. Finite elements Calculations by were carried out in order to identify the dynamic properties of the elements which take part in machining like the structural elements (lathe, tool holder, cutting tool, workpiece, tail-stock, tool-overhang,...). An experimental design of the cutting parameters (depth of cutting, feed rate and cutting speed) was used and a series of tests of turning was carried out. The results showed a significant effect between these parameters on surface roughness, the consumed power, the cutting time, the tool vibrations and finally a better comprehension of the cutting process.

Mots clefs : Paramètres de coupe, Plan d'expérience, Simulation, Tournage, Vibration

1 Introduction

Le développement de l'ingénierie de production depuis la révolution industrielle s'est accompagné d'une augmentation permanente des standards de qualité. A l'importance du respect des formes, dimensions, tolérances et qualité de surface s'ajoute la maîtrise totale du processus de fabrication. Grâce à l'expérience acquise depuis maintenant plus d'un siècle la capacité du processus de fabrication par enlèvement de matière a augmentée considérablement même si l'ensemble Machine-Outil-Pièce reste un ensemble ayant des caractéristiques dynamiques particulièrement complexes. Sous certaines conditions (figure 1), des vibrations peuvent se produire entraînant avec elles non-qualité (mauvais états de surface) ou rupture de l'outil. Ces vibrations peuvent être regroupées en 3 catégories [1] :

- Vibrations libres : résultant d'impulsions transférées à la structure à travers ses fondations due à des déplacements rapides de pièces à forte masse (table de machine d'usinage) ou de l'engagement

de l'outil. La structure vibre à ses fréquences naturelles jusqu'à ce que l'amortissement présent dans la structure ne l'en empêche.

- Vibrations forcées : causées par des forces périodiques comme par exemple des balourds ou des variations de forces de coupes exercées sur la machine. L'outil oscille à la fréquence forcée et si cette fréquence correspond à une des fréquences propres de la structure alors la machine entrera en résonance au mode naturel de vibration correspondant.
- Vibrations auto excitées : dues la plus part du temps à une instabilité dynamique du processus de coupe (variation du frottement copeau/outil au cours de l'usinage), ces vibrations sont la cause du phénomène appelé broutage. Elles apparaissent, pour une machine donnée, seulement quand certaines conditions de coupe sont réunies : profondeur de coupe, orientation de la coupe par rapport à la machine, nombre de dent ou diamètre de l'outil, type de matériel, etc.

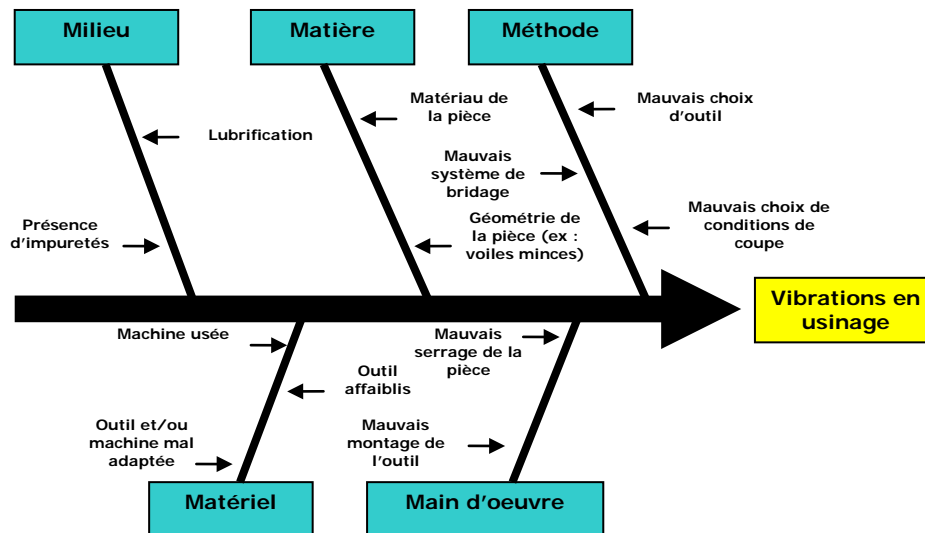


FIG. 1 – Digramme ISHIKAWA des causes principales des vibrations en usinage

Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés à un de ces problèmes : les vibrations en usinage. C'est un phénomène qui dépend de nombreux paramètres [2] comme les paramètres de coupe, la géométrie de l'outil, etc... et dont les conséquences sont par exemple une dégradation de l'état de surface ou si l'intensité atteint des niveaux extrêmes peut provoquer la rupture de l'outil. Un grand nombre d'étude analytique et expérimentale ont été réalisées afin de mettre en évidence ses effets en tournage sur la rugosité de surface [3,4], les efforts de coupes [5] et les vibrations de l'outil [2,6]. Ce phénomène étant encore mal connu, notre objectif est d'en éclaircir les origines et de mieux le comprendre. Des essais et des simulations numériques ont été effectuées afin de mettre en évidence les paramètres caractéristiques des vibrations en usinage comme l'outil de coupe, le porte-outil, la pièce usinée, la sortie d'outil, la sortie de la pièce, Un plan d'expérience a été réalisé afin d'étudier les effets des paramètres de coupe comme la profondeur de passe, l'avance et la vitesse de coupe. Une série d'essais en tournage ont été réalisés et les vibrations produites ont été mesurée à l'aide d'accéléromètres placés sur le porte-outil.

2 Paramètres de coupe en tournage

2.1 Conditions expérimentales

Pour réaliser nos essais de tournage nous avons utilisé un tour SOMAB Unimab 500 d'une puissance de 24kW et ayant une vitesse de rotation maximale de 2500 tr/min. L'opération de tournage a été réalisé à sec car cette condition est plus sévère (figure 2) et semble être une solution d'avenir d'un point de vue environnemental [7]. Le matériau choisi est une fonte grise à graphite lamellaire FT25 (ou FGL250) avec 3.5% de carbone, d'une dureté moyenne de 322 Hv. Les dimensions du cylindre usiné sont 220 mm de longueur et 190 mm de diamètre après préparation. Le choix de ce matériau nous assure une usure régulière de la plaquette de coupe. La plaquette utilisée est une plaquette polyvalente en carbure de tungstène revêtue par le procédé MTCVD (TiCN/Al₂O₃/TiN) dont la désignation est ISO CNMG 120408 et montée sur un porte-outil ISO DCLNL 2525M12.

Dans notre démarche expérimentale, le premier problème à résoudre sur site est le positionnement des capteurs. Ce dernier est défini selon les contraintes d'installation suivantes : à proximité de la zone de coupe, indépendant du changement d'outil et sur une partie fixe de la machine. Cependant, plusieurs endroits de la machine sont inaccessibles ce qui limite le nombre de capteurs et leurs positionnements. Dans cet esprit, les accéléromètres utilisés ont été fixé sur le porte-outil (figure 3) afin de mesurer les réponses vibratoires dans l'outil de coupe selon les trois axes de la machine : la direction verticale X (ou radiale), la direction perpendiculaire Y (ou tangentielle) et la direction longitudinale Z (ou axiale).

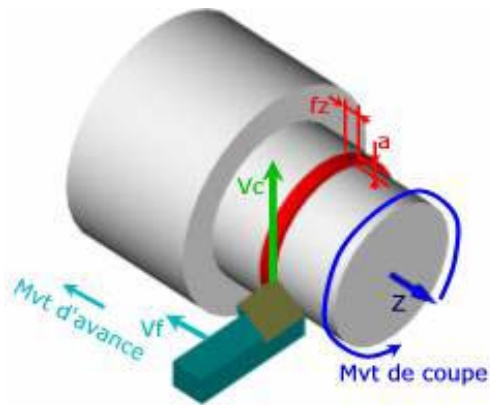


FIG. 2 – Schéma d'une opération de tournage



FIG. 3 – Porte-outil instrumenté

Un système d'acquisition B&K piloté par le logiciel PULSE LabShop a permis d'enregistrer dans son intégralité les signaux accélérométriques générés au cours d'un usinage sur une bande utile de [0 - 6400~Hz] et à une fréquence d'échantillonnage de 16384~Hz.

2.2 Sélection des paramètres

Dans cette étude, nous nous sommes limités aux principaux paramètres pouvant avoir une action sur les vibrations rencontrées en tournage. Ces paramètres sont : pour le bloc pièce (fixations et longueur), pour le bloc outil (sortie d'outil et vibrations d'outil) et pour les conditions de coupe (la profondeur de passe, l'avance et la vitesse de coupe) [8].

Un plan factoriel complet a donc été utilisé pour évaluer les effets des conditions de coupe sur la rugosité de surface, la puissance consommée, les efforts de coupe et les vibrations de l'outil au cours d'une opération de tournage à sec. Cependant seules les vibrations de l'outil sont présentées dans ce travail. Les valeurs des paramètres sont choisies en accord avec les recommandations du catalogue du fabricant de l'outil de coupe [9]. Les paramètres choisis, leurs symboles et la plage de variation sont donnés dans la Table 1, les autres étant constants.

| Paramètre | Symbole | Unité | Niveaux | | |
|---------------------|---------|-----------|---------|-------|-----|
| | | | min | moyen | max |
| Profondeur de passe | a_p | mm | 1.5 | | 3 |
| Avance | f | mm / tour | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
| Vitesse de coupe | V_c | m / min | 155 | 310 | 465 |

Tab. 1: Valeurs des paramètres indépendants

3 Analyse par éléments finis

Afin d'obtenir un modèle élément finis du bloc pièce et du bloc outil, le logiciel ANSYS a été choisi. Tous les modèles ont utilisés l'élément fini Solid45. La distribution des éléments est uniforme et adaptée aux conditions aux limites. Ainsi dans les parties avec des dimensions relativement petites comme l'outil, le porte-outil, la pièce et la contre-pointe, les dimensions des éléments sont adaptées et contrôlées. Les fréquences propres des différents modèles éléments finis sont obtenues par l'intermédiaire du logiciel ANSYS et la méthode de sous-espace.

3.1 Hypothèse de conservation de la masse

Une hypothèse que nous devons vérifier en usinage par enlèvement de matière est la conservation de la

masse. En effet, au cours de l'opération d'usinage, quand la matière est retirée de la pièce, la masse totale de la pièce et sa raideur sont modifiés. Par conséquent, son comportement statique mais surtout dynamique devraient être modifiés. Ainsi une simulation du chariotage avec un pas de 10mm a montré une très légère variation des propriétés dynamique de la pièce usinée (Table 2). Deux types de conditions aux limites ont été étudiés pour la représentation de la pièce dans les mors du tour : l'une avec un encastrement à sa base et l'autre à l'aide de la pression exercée par les mors sur la pièce. La contre-pointe a été modélisée par une liaison pivot.

| Mode (Hz) / Diamètre (mm) | 95 | 91 | 87 | 83 | 79 | 75 | 71 | 67 | 63 | 59 | 55 | 51 | 47 |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| 1 | 2290 | 2327 | 2365 | 2403 | 2447 | 2457 | 2423 | 2372 | 2326 | 2269 | 2205 | 2149 | 2054 |
| 2 | 2541 | 2539 | 2531 | 2509 | 2483 | 2458 | 2424 | 2377 | 2330 | 2271 | 2206 | 2152 | 2062 |
| 3 | 2544 | 2542 | 2532 | 2511 | 2485 | 2513 | 2588 | 2661 | 2765 | 2888 | 3051 | 3288 | 3416 |
| 4 | 4499 | 4597 | 4688 | 4775 | 4885 | 5010 | 5154 | 5221 | 5241 | 5234 | 5212 | 5190 | 5090 |
| 5 | 4785 | 4895 | 4989 | 5056 | 5105 | 5165 | 5208 | 5228 | 5243 | 5240 | 5216 | 5191 | 5092 |
| 6 | 4794 | 4903 | 4991 | 5059 | 5118 | 5172 | 5210 | 5271 | 5452 | 5603 | 5797 | 6063 | 6190 |
| 7 | 6473 | 6523 | 6576 | 6625 | 6680 | 6746 | 6819 | 6885 | 6974 | 7072 | 7160 | 7091 | 6976 |
| 8 | 6877 | 6976 | 7088 | 7179 | 7252 | 7340 | 7382 | 7357 | 7325 | 7249 | 7166 | 7097 | 6994 |
| 9 | 6885 | 6968 | 7089 | 7182 | 7274 | 7348 | 7383 | 7366 | 7331 | 7258 | 7196 | 7383 | 7505 |
| 10 | 9438 | 9422 | 9426 | 9442 | 9488 | 9508 | 9755 | 9869 | 9990 | 10001 | 9958 | 9876 | 9628 |

Tab. 2: Evolution des propriétés dynamique de la pièce

3.2 Mode propre de l'outil de coupe

Les fréquences propres et les déformées modales de l'outil de coupe composé du porte-outil et de l'outil sont illustrées figure 4.

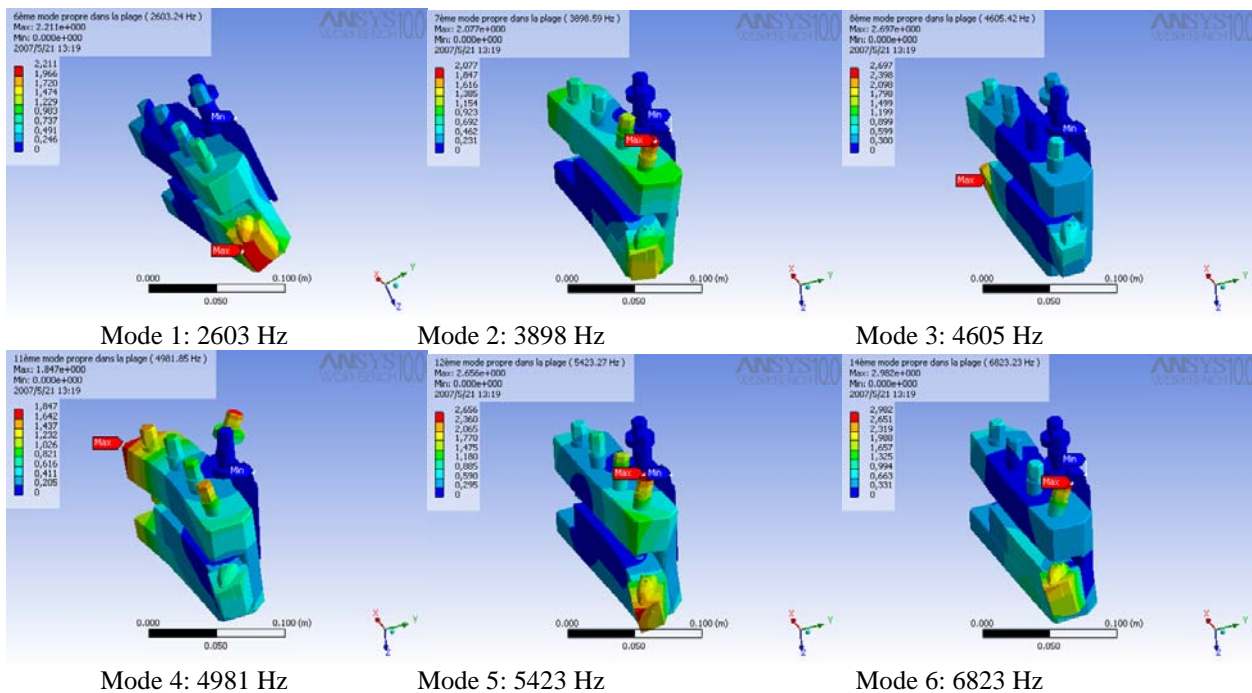


Fig. 4: Modes propres et déformées modales de l'outil de coupe

3.3 Effets de la sortie de l'outil

La sortie de l'outil a été étudié selon trois configurations : 25% (0.25*L), 33% (0.33*L) and 50% (0.5*L) de la longueur L (figure 5). Comme le montre la figure 6, les simulations nous montrent l'influence importante de la sortie de l'outil sur les modes propres de l'outil de coupe (outil+porte-outil). Ainsi, lorsque l'on passe d'une sortie d'outil de 25% à 33% de sa longueur, la fréquence propre du mode fondamental décroît de 25%. Dans le même temps, cette même fréquence propre décroît de 45% lorsque l'on passe à 50% de sortie d'outil. Ces simulations montrent clairement la très grande influence de ce paramètre notamment sur le premier mode qui est un mode représentatif de la stabilité du processus d'usinage (notamment le calcul des lobes de stabilité).

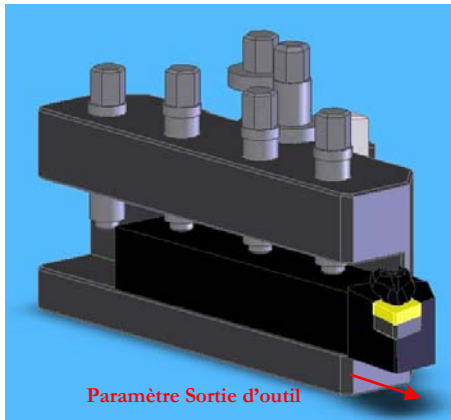


Fig. 5: Paramètre sortie d'outil

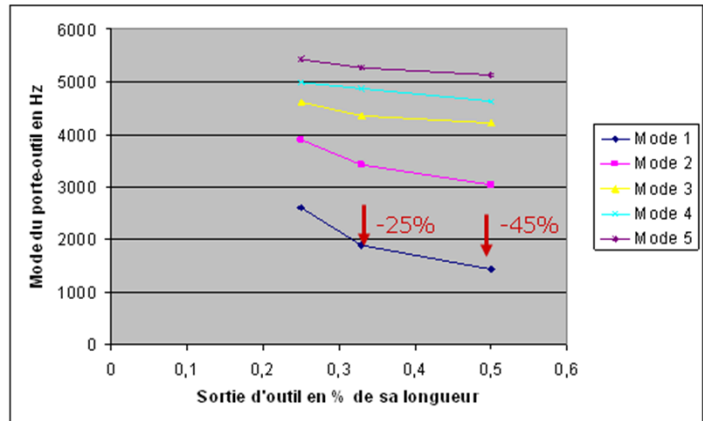


Fig. 6: Effets de la sortie d'outil

4 Analyse expérimentale

4.1 Analyse modale expérimentale de l'outil de coupe

Le sonnage du porte-outil a été réalisé à l'aide d'un marteau d'impact instrumenté avec un capteur de force piézoélectrique (selon le protocole du Tap Test). La Densité spectrale de puissance (DSP) de la réponse dynamique de l'outil de coupe a été enregistrée et cinq modes dominant ont été excités de cette façon comme le montre la figure 8. Les deux premières fréquences propres coïncident avec les fréquences propres du modèle numérique associé (figure 4).

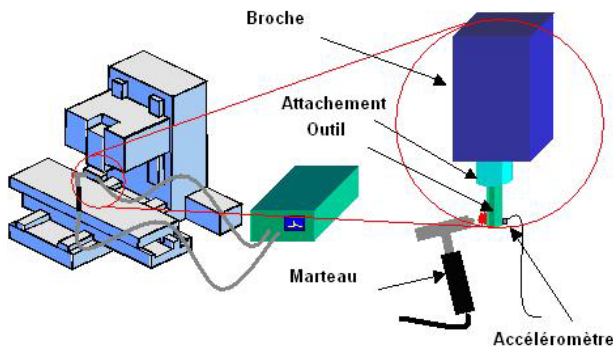


Fig. 7: Sonnance de l'outil (Tap test)

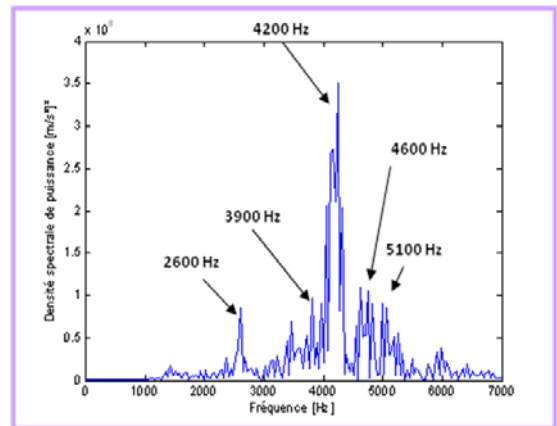
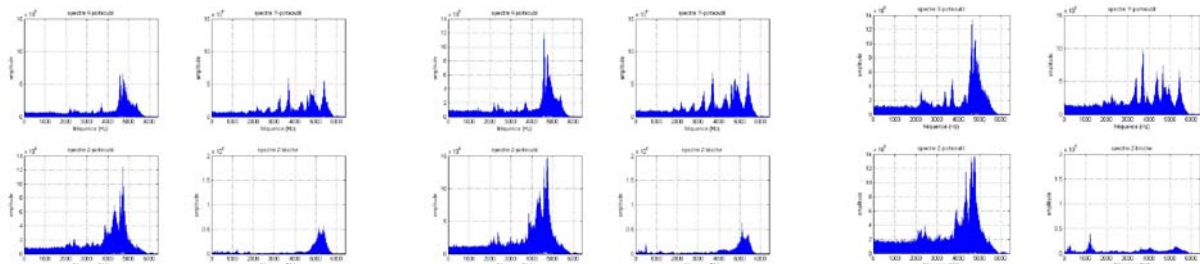


Fig. 8: DSP of the tool vibration

4.2 Effet de la sortie d'outil

Trois sorties d'outil ont été testées : 25%, 33% et 50% de la longueur de l'outil. La figure 9 montre l'importance de ce paramètre sur la réponse dynamique de l'outil de coupe.



0.25*L

0.33*L

0.5*L

Fig. 9: Représentation spectrale des vibrations de l'outil dans les trois configurations

En effet un allongement de la sortie d'outil entraîne une modification de la fréquence et une augmentation de

l'amplitude quelque soit la direction enregistrée comme nous l'avons déjà simulé précédemment (figure 6).

4.3 Effets des paramètres de coupe

En se basant la valeur moyenne des accélérations subies par le porte-outil, nous pouvons observer une multiplication de l'amplitude des vibrations par 2 à 3 lorsque la vitesse de coupe V_c passe de sa valeur la plus faible à sa valeur moyenne, alors que lorsque la vitesse de coupe passe de sa valeur moyenne à la vitesse de coupe maximale nous avons une variation de l'amplitude des vibrations allant d'une légère diminution (-10%) à une stagnation. La vitesse de coupe et l'amplitude des vibrations ne sont donc pas proportionnelles. On doit noter qu'avec l'avance la plus forte, nous n'avons plus stagnation du niveau vibratoire à partir de V_c moyen mais encore augmentation de celui-ci pour les accélérations moyennes suivant x et y il y a donc une interaction entre la vitesse de coupe et l'avance. Les vibrations du porte-outil n'évoluent donc pas linéairement avec l'avance mais c'est un paramètre influant sur les vibrations en tournage. La profondeur de passe doit donc être considérée comme un facteur influant même si cette influence peut être faible dans certain cas.

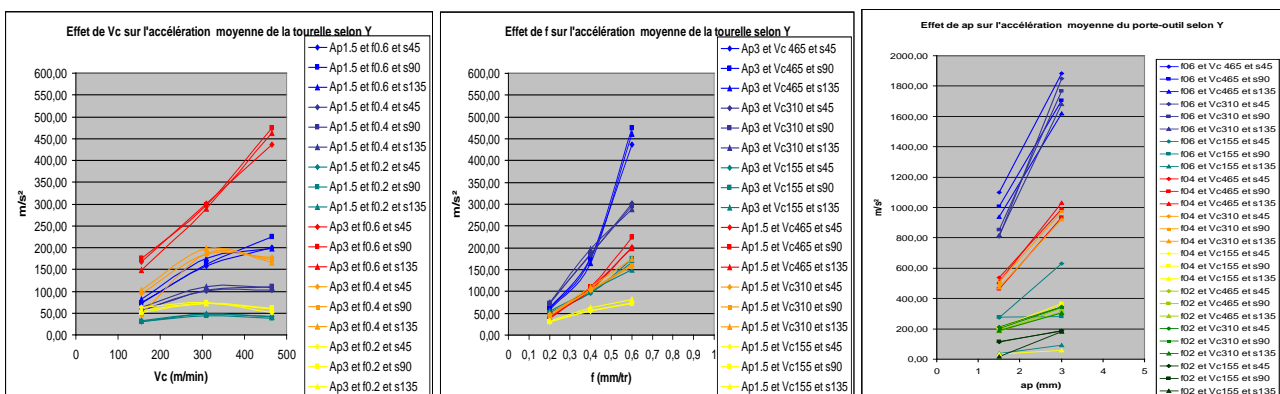


Fig. 10: Effets des paramètres de coupe (V_c , f , a_p) sur les accélérations RMS dans la direction Y

5 Conclusion

Dans cet article, l'utilisation des mesures vibratoires a permis d'analyser les vibrations produites au cours d'une opération de tournage à sec. De nombreuses simulations réalisées à l'aide du logiciel ANSYS et une ambitieuse campagne expérimentale n'ont pu être présentés ici par manque de place. Cependant, l'influence importante du paramètre sortie d'outil sur la réponse vibratoire ainsi que des conditions de coupe (V_c , f , a_p) nous ont permis de mieux évaluer l'effets de ces paramètres sur la rugosité de surface, la puissance consommée, les efforts de coupe et les vibrations. Les résultats indiquent que l'avance est le paramètre le plus significatif sur la rugosité de surface. La vitesse de coupe et l'avance sont les paramètres les plus influents sur le temps d'usinage et donc sur la productivité. Les vibrations de l'outil sont fonction de la vitesse de coupe, de l'avance et de la profondeur de passe dans cet ordre décroissant. Finalement, cette méthode va nous permettre de définir des modèles de prédiction qui vont nous aider à définir quelles conditions de coupe optimales doivent être utilisées pour une opération de tournage donnée.

6 Références

- [1] S. A. Tobias and J. P. Gurney, International Journal of Machine Tool Design and Research, 1961.
- [2] Y. Altintas, "Manufacturing automation", Cambridge University Press, 2000.
- [3] M. Joseph Davidson, K. Balasubramanian, G.R.N. Tagore, Journal of materials processing technology, 202, 41-46, 2008.
- [4] A.P. Paiva, J.R. Ferreira, P.P. Balestrassi, Journal of Materials Processing Technology, 189, 26-35, 2007.
- [5] P.G. Benardos, G.C. Vosniakos, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 18, 343-354, 2002.
- [6] Sturesson, P.O.H., Hakansson, L., Claesson, I., Mechanical Systems and Signal Processing, 11 No. 3, 459-489, 1997.
- [7] P.S. Sreejith, B.K.A. Ngoi, Journal of materials processing technology, 101, 287-291, 2000.
- [8] H. Singh, P. Kumar, Indian Journal of engineering and materials sciences, 11, 19-24, 2004.
- [9] SANDVICK Coromant, "Turning tools catalogue", Pratical handbook, English edition, 2007.