An Experimental Method for the Cutting Process in Three Dimensions

D. Toulouse, Y. Couetard, O. Cahuc, A. Gerard

► To cite this version:

D. Toulouse, Y. Couetard, O. Cahuc, A. Gerard. An Experimental Method for the Cutting Process in Three Dimensions. Journal de Physique IV Proceedings, 1997, 07 (C3), pp.C3-21-C3-26. 10.1051/jp4:1997306 . jpa-00255379

HAL Id: jpa-00255379

<https://hal.science/jpa-00255379>

Submitted on 1 Jan 1997

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.

An Experimental Method for the Cutting Process in Three Dimensions

D. Toulouse, Y. Couetard, O. Cahuc and A. Gerard

Laboratoire Mécanique, 351 Cours de la Libération, 33405 Talence, France

Abstract. Moments at the end of the cutting tools have been observed from the development of the six components dynamometer. So, one of the components of the moment in the direction of speed rotation intervenes in the calculation of the mechanical power consumed by the cutting. The evolution of specific energy and specific effort of the cutting can be compared from a series of experimentation with variable advance and variable pass depth.

Résumé. A partir de la mise au point d'un dynamomètre à six composantes, des moments à la pointes des outils coupants ont été mis en évidence. Or une des composantes du moment dans la direction de la vitesse de rotation intervient dans le calcul de la puissance mécanique consommée par la coupe. A l'aide d'une série d'essais à avance et profondeur de passe variables, les évolutions de l'énergie spécifique de coupe et de l'effort spécifique de coupe sont comparées.

1. INTRODUCTION

La mise en forme par enlèvement de matière a toujours fasciné, questionné, et inquiété les mécaniciens. En effet la phénoménologie rencontrée dans la coupe est très complexe, bien souvent transitoire, à l'échelle microscopique et donc difficilement observable. Ainsi, de nombreux modèles numériques tels que ceux de Merchant [1], d'Oxley [2] ou plus récemment Gilormini [3] et bien d'autres, ont vu le jour depuis ces cinquante dernières années. Cependant l'usinage n'est toujours pas considéré dans l'entreprise ou dans le monde comme le fruit d'une démarche scientifique, mais reste plutôt, le résultat d'une démarche empirique, propriété de quelques "artistes usineurs".

Par contre, avec le développement accru des moyens informatiques, on simule de façon réaliste la déformation subie par la matière lors d'opérations de filage, d'extrusion ou de rabotage [4]. L'idée de doter l'industriel d'un outil de simulation simple afin qu'il puisse prévoir l'usure des outils, la forme du copeau, la puissance nécessaire à la machine, est alléchante. C'est grâce au formidable outil que sont les éléments finis que des codes de calcul ont pu être développés en ce sens. Cependant une bonne simulation passe avant tout par un problème bien posé et basé sur des lois appropriées. Or dans la coupe, il est encore très difficile de se rapprocher au mieux de la réalité en ce qui concerne les conditions sur le frottement, la loi de comportement du matériau ou les échanges de chaleur, etc.. Il reste beaucoup trop de questions sans réponse et de phénomènes inexpliqués à ce jour, comme entre autres, la forme d'enroulement du copeau ou sa direction de sortie. La difficulté que l'on a à les formuler provient peut-être du fait que jusqu'à présent, nous ne pouvions pas réaliser certaines mesures, comme par exemple la mesure simultanée du moment et de la résultante des actions de coupe suivant les trois directions de l'espace.

Il est à noter que jusqu'ici la validation des modèles numériques a toujours été effectuée grâce au relevé des trois composantes de la résultante de coupe. De plus, à notre connaissance, il n'y a jamais eu de comparaison entre l'énergie électrique consommée par le moteur du tour et l'énergie mécanique consommée par la coupe. En fait, le concept de la présence de moments sur une surface de petite dimension a toujours été repoussé au nom du "contact ponctuel". Or dans la formation du copeau, de très grandes énergies sont dissipées dans de petits volumes de matière donc il semblait intéressant de regarder si une partie de cette énergie ne pouvait pas être due à la présence de moments à l'interface outil/matière.

Un système d’acquisition des six composantes du torseur représentatif de l’action du copeau sur l’outil a donc été mis au point.

De nombreux essais ont été réalisés en faisant varier l’avance (f), la profondeur de passe (ap), les matériaux, les outils, etc.. Il a été observé que dans certains cas, il y a bien transmission de moments par le biais de la liaison "collante" entre l’outil et le copeau. Cet article se propose de faire une synthèse sur quelques observations et de les discuter.

2. HYPOTHESES

Pour représenter les composantes du torseur des actions du copeau sur l’outil, il est nécessaire d’adopter une notation, et nous utiliserons celle de la norme ISO [5], dans un repère lié à l’outil et dont son origine D est un point se situant au milieu de l’arête de coupe de la plaquette. Toutes les composantes seront liées au repère (D, $\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z}$) quels que soient l’opération de tournage et les sens. Suivant que l’on réalise un surfacage ou un chariotage, $\vec{Y}, -\vec{Z}$, et $\vec{X}$ peuvent être respectivement la direction et le sens de la vitesse de coupe, de l’avance et de la profondeur de passe (Fig. 1).

Fig. 1 : Représentation des actions mécaniques.

La puissance mécanique totale consommée par la coupe peut alors s’écrire comme étant le comoment du torseur statique et du torseur cinématique :

$$P = [S_{\text{pièce} \rightarrow \text{outil}}]_D \otimes [C_{\text{pièce/outil}}]_D = F_x \cdot V_x + F_y \cdot V_y + F_z \cdot V_z + M_x \cdot \Omega_x + M_y \cdot \Omega_y + M_z \cdot \Omega_z. \tag{1}$$

Dans un mouvement de chariotage dans la direction $-\vec{Z}$ avec un outil couteau, le torseur cinématique a 3 composantes non nulles V_y, V_z et Ω_z . La puissance mécanique totale se restreint donc à une nouvelle relation plus simple :

$$P = F_y \cdot V_y + F_z \cdot V_z + M_z \cdot \Omega_z. \tag{2}$$

En ce qui nous concerne les vitesses d'avance utilisées dans ces essais étant très faibles, le terme $F_z \cdot V_f$ (puissance due à l'avance) ne correspond qu'à 1% de la puissance totale, il a donc été négligé ; V_y est la vitesse de coupe exprimée en m/s et Ω_z la vitesse de rotation de la broche exprimée en rad/s.

3. METHODE EXPERIMENTALE

Pour estimer la puissance mécanique totale consommée dans la coupe à partir de celle consommée par la machine, il faut connaître tout d'abord le rendement global de la machine en fonction de son chargement. La mesure de la puissance électrique se fait ensuite à l'aide d'un wattmètre monté pour une utilisation en triphasé équilibré. Le résultat affiché est la puissance active totale consommée par le tour. On peut, grâce au tracé de l'évolution de la charge en fonction de la puissance électrique consommée et des données du constructeur, en déduire la puissance mécanique totale dissipée à partir de la puissance électrique lue sur le wattmètre :

$$P = \eta_{\text{(charge)}} * P_e . \quad (3)$$

Pour mesurer les six composantes du système représentatif des actions de coupe, on utilise un dynamomètre conçu au L.M.P et faisant l'objet d'un brevet. Ce dynamomètre renvoie six signaux découplés qui sont ensuite amplifiés par des conditionneurs pour passer d'une plage de + ou - 30 mV sur une plage de + ou - 5 V. Le signal est alors récupéré à la sortie de l'amplificateur par une carte de conversion analogique et numérique (8 voies - 16 bits). Un logiciel (TABLE_6 V3.5) qui est écrit dans un langage natif (Pascal), enregistre et traite les signaux (Fig. 2). La fréquence d'enregistrement peut aller de 4 Hz à 6000 Hz sur les six voies pour une acquisition de 1700 points de mesure ou 3400 points pour les basses fréquences. Pour le tournage, nous travaillons généralement à 200 Hz pour avoir un enregistrement de 7 à 8 secondes ce qui laisse à la coupe le temps de se stabiliser en température.

Fig. 2: Chaîne d'acquisition et de traitement.

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Les résultats présentés ici sont relatifs à l'usinage d'éprouvettes cylindriques en 27 CD 4 à l'aide d'un outil à chariotier à plaquette carbure. L'angle de coupe ϕ est de -6° , l'angle de dépouille α est de 6° , l'angle de direction d'arête κ_r est de 93° et l'angle d'inclinaison λ_s est de -7° . Le rayon de bec est de 1.2 mm.

La vitesse de coupe est de l'ordre de 120 m/min sur un diamètre de 30 mm, ce qui correspond à une vitesse de rotation de la pièce de 1270 tr/min.

4.1 Influence de la géométrie des plaquettes et de l'avance

Nous avons fait varier l'avance f de 0.1 à 0.4 mm/tr avec un pas de 0.05 mm/tr et ceci pour une profondeur de passe ap de 0.5 mm (conditions de semi-finition ou finition avant rectification).

Les courbes représentant les composantes de la résultante sont assimilables à des fonctions affines, qui sont fonctions croissantes de l'avance (Fig. 2 .a).

a) Forces
b) Moments
Fig. 3 : Variations des composantes du torseur en fonction de f .

En revanche, en ce qui concerne les composantes du moment résultant, on ne peut plus parler de linéarité rien qu'en observant la non monotonie de M_x (Fig.3 b). Cela est dû non seulement à l'influence du rayon de bec mais aussi à la géométrie du brise copeau.

4.2 Influence de la profondeur de passe.

Les efforts suivant y et z sont des fonctions croissantes de ap , par contre l'effort F_x semble très peu influencée par une variation de profondeur de passe (Fig. 4 a). Cela provient principalement du fait que le k_r est proche de 90° si bien que l'outil frotte peu sur la pièce.

a) Forces
b) Moments
Fig. 4 : Variation des composantes du torseur en fonction de ap .

Les moments sont quant à eux des fonctions croissantes de ap (Fig.4 b). A partir de ces constatations, il semble que l'on puisse relier chaque composante du moment à la section coupée, soit par une fonction de la section, soit par une densité surfacique de moment de frottement au pivotement ou au roulement.

4.3 Influence de la vitesse de coupe et du matériau.

Pour les deux matériaux, acier XC 38 et Inconel 800, la profondeur de passe et l'avance sont respectivement égales à 2 mm et 0.2 mm/tr. Les composantes du moment semblent, pour des grandes vitesses de coupe, être des fonctions décroissantes comme les composantes de la résultante de coupe. Ceci montre que ces composantes sont influencées par la chute de la contrainte d'écoulement aux grandes vitesses de coupe (Fig. 5 a). Ce qui implique que pour des matériaux très écrouissables tel que l'Inconel 800, on soit amené à enregistrer des informations très perturbées voire difficiles à exploiter (Fig.5 b).

a) acier XC 38

b) Inconel 800

Fig. 5 : variation de Fy et Mz en fonction de Vc et du matériau.

La variation de vitesse ayant été obtenue en dressage par changement de rayon à vitesse de rotation constante.

4.4 Différence entre effort et énergie spécifique de coupe.

A partir du relevé de Mz et Fy et des données sur la cinématique du tour, on peut calculer la puissance mécanique totale consommée par la coupe. Par commodité pour établir un couple outil-matière afin de générer des banques de données, les usineurs préfèrent calculer l'énergie spécifique de coupe e_c :

$$e_c = P / (A_D \cdot V_y) = (F_y \cdot V_y + M_z \cdot \Omega_z) / (A_D \cdot V_y), \quad (4)$$

où A_D est la section de copeau coupée.

Si effectivement la puissance totale consommée dans la coupe se résume simplement au terme $F_y \cdot V_y$ alors la relation 4 peut s'écrire plus simplement et être homogène à un effort par unité de surface que l'on appelle effort spécifique de coupe k_c :

$$k_c = F_y / A_D. \quad (5)$$

Cependant comme nous ne négligeons pas le terme $M_z \cdot \Omega_z$ dans le calcul de P, nous représentons e_c , k_c et E en fonction de l'avance f, pour mettre en évidence la marge d'erreur que l'on peut commettre à confondre e_c et k_c dans certains cas. E est l'énergie spécifique mécanique corrigée, elle est calculée à partir de la puissance mécanique déduite de la puissance électrique consommée par le tour :

$$E = \eta \cdot P_e / (A_D \cdot V_y). \quad (6)$$

On remarque, que E et e_c sont relativement proches et que la différence peut se justifier par une valeur du rendement η du tour légèrement surestimé de 2 à 8 %. Par contre il existe une différence moyenne de 40 à 50 % entre e_c et k_c (Fig. 6).

Fig. 6 : Variation des énergies spécifiques de coupe en fonction de l'avance f .

5. CONCLUSION

L'idée de pouvoir enregistrer les six composantes du torseur représentatif des actions du copeau sur l'outil doit permettre de mieux formuler les lois qui régissent les sollicitations du copeau pendant la coupe, de mieux appréhender les évolutions des conditions de striction et de frottement à l'interface outil/matière. Si, de plus, on couple à un tel système une acquisition de la cartographie des températures à l'aide de thermographie à infrarouge et/ou de thermocouples, et une acquisition vidéo de la cinématique du copeau alors on pourra mieux expliciter l'énergie de déformation totale nécessaire à la formation du copeau. Un meilleur bilan énergétique mécanique doit diminuer le risque d'erreur sur la prévision des efforts de coupe, de l'épaisseur du copeau, de la longueur de contact, etc.. Le copeau subit des déformations de flexion et/ou de torsion qui semblent liées à la direction et au sens de certaines composantes du moment du torseur des actions de coupe.

Références

- [1] BOURDET.P, "La coupe des métaux", Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Supérieur. Juil. (1982).
- [2] HASTING.W.F, MATHEW.P & OXLEY.P.L.B, "A machining theory for predicting chip geometry, cutting forces etc.. from work material properties and cutting conditions", Proceeding of the Royal Society of London, Vol. 371, pp 569-587, (1980).
- [3] GILORMINI.P, "Contribution à la modélisation de la formation du copeau en usinage des métaux", THESE à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 11 Jan. (1982).
- [4] JOYOT.P, "Modélisation numérique et expérimentale de l'enlèvement de matière (application à la coupe orthogonale) ", THESE à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, (1994).
- [5] NORME FRANÇAISE ISO 3002/4, "Grandeur de base en usinage et rectification, Forces, énergie et puissance", Juin (1986).