

CFA/VISHNO 2016

Analyse et modelisation vibratoire du outil de presse à découper,

T. Jeannin^a, G. Monteil^a, L. Carpentier^a, G. Chevallier^b et J. Chambert^a

^aENSM-UMR-FEMTO-ST, 26 chemin de l'épitahe, 25030 Besançon, France

^bDépartement mécanique appliquée, Institut FEMTO-ST, 24 rue de l'Épitahe, 25000 Besançon, France

thomas.jeannin@femto-st.fr



LE MANS

Ce travail porte sur la fatigue et l'usure des outils de presse à découper. L'usure de ces outils est inévitable, mais peut être réduite afin d'en augmenter la durée de vie. Par ailleurs, avec l'utilisation des poinçons en carbure de tungstène dans les outils de presse à découper, les casses d'outils par fatigue ou par propagation de fissures, deviennent courantes. Ces casses surviennent de manière aléatoire et immobilisent, le temps de la réparation, toute la ligne de production. Deux études expérimentales ont été menées. Une analyse modale du montage a permis de mettre en évidence les modes de vibration du montage et du poinçon. Une analyse vibratoire opérationnelle, en production a permis de mettre en évidence les différentes sollicitations imposées au poinçon, en fonction des paramètres de découpe. Dans les deux cas, ce sont les vibrations longitudinales du poinçon, intervenant lors de la fissuration de la pièce découpée, qui ont attiré notre attention. L'acquisition des déformations du poinçon faite par une jauge, ainsi que la mesure de l'effort de découpe montrent que les résonances sont observables sur le capteur d'effort situé à l'arrière du poinçon mais non sur la jauge de déformation collée sur le poinçon. Afin d'expliquer ces observations, une modélisation de la chaîne cinématique de la presse à découper a été mise en place. Cette modélisation permet de visualiser les différents modes de vibrations du poinçon mais aussi de son support dans l'outil. Enfin, pour revenir à la problématique de départ, le comptage des cycles de vibrations et de leur amplitude permet de définir un cahier des charges pour l'étude de la fatigue. Le calcul du cumul d'énergie dissipée permet d'estimer l'usure du poinçon.

1 Introduction

Le découpage permet la réalisation de pièces en grande série et à bas coût. Ce procédé de mise en forme est particulièrement bien adapté à la fabrication de pièces métalliques complexes dans des matériaux très variés (acier, inox, alliages de titane, cuivreux, métaux nobles etc.). L'enlèvement de matière se fait par cisaillement par l'intermédiaire d'un poinçon et d'une matrice. Maillard et al. [1] décompose le procédé de découpe en 5 phases :

- Mise en place de la tôle sur la matrice.
- Montée en charge linéaire (comportement élastique du matériau).
- Régime élasto-plastique avec cisaillement.
- Phase de rupture, propagation brutale d'une fissure.
- Phase d'expulsion de la pièce découpée.

Ces 5 phases sont représentées sur la Figure 1, sous forme de schémas et sur la courbe effort/déplacement.

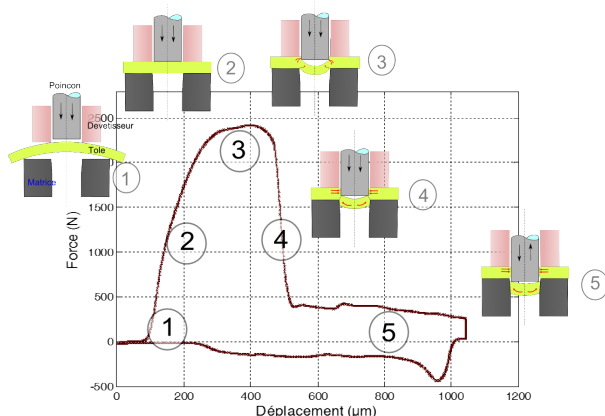


FIGURE 1 – Représentation des différentes étapes de découpe en fonction de la courbe effort/déplacement lors d'une opération de découpe.

Les travaux de recherche sur les matériaux d'outils de découpe sont nombreux, les entreprises visant toujours une meilleure productivité et une qualité de

pièces irréprochable. Afin de réaliser un maximum de pièces à la bonne géométrie avec un minimum d'affutages, la durée de vie des poinçons doit être augmentée. En effet la qualité des pièces découpées est directement régie par l'usure du poinçon [2, 3]. L'usure du poinçon (Figure 2) est conditionnée par les sollicitations importantes en termes de pression de contact, et de frottement à l'interface entre la tôle et l'outil. Plusieurs types d'usure peuvent être observés, l'usure par abrasion, par adhésion [4] ou tout simplement la casse par fatigue. L'utilisation de poinçons en carbure de tungstène permet de réduire fortement les deux premiers mécanismes d'usure mais la ténacité en est fortement réduite. Le nombre de casses d'outils par fissuration ou écaillage est en effet en augmentation. Une fois la tôle fissurée, le poinçon subit des efforts qui oscillent entre traction et compression. Ce mécanisme d'usure par fatigue est peu étudié et une meilleure connaissance des sollicitations du poinçon permettrait de définir un cahier des charges pour réaliser des études de fatigue sur les matériaux de poinçons. De plus des vibrations sont provoquées au moment de la rupture de la tôle [5]. Il a été montré que le poinçon vibre en régime libre sur son mode de traction, une fois la tôle fissurée [6]. Des études montrent qu'il est possible de réduire le bruit généré par les vibrations en ajoutant différents types d'amortisseurs (hydrauliques, magnéto-rhéologiques, à inertie) sur la presse [7, 8]. Toutefois, l'avantage de l'utilisation de ce type d'amortisseurs sur l'usure des poinçons n'est pas démontré. Afin de reproduire précisément les mécanismes d'usure des poinçons, par des essais tribologiques ou de fatigue, une connaissance plus précise des sollicitations subites par ceux-ci est nécessaire. Une campagne de mesures permettant d'évaluer l'influence des paramètres de découpe (vitesse, lubrification, matière découpée) sur le coefficient d'usure énergétique du poinçon a été menée. L'énergie dissipée pour découper une pièce peut être déterminée sur une courbe effort/déplacement. Par la suite, après un certain nombre de pièces découpées, la géométrie du poinçon est mesurée afin d'évaluer le volume usé. On peut donc obtenir un coefficient d'usure

énergétique que l'on notera α_u tel que :

$$\alpha_u = \frac{\text{Volume usé}}{\text{Energie dissipée}} \quad (1)$$

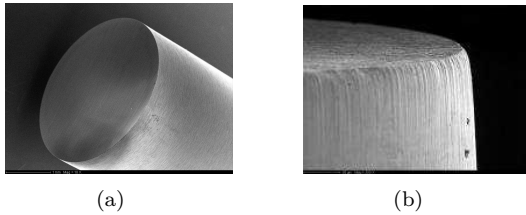


FIGURE 2 – Images MEB de l'arête de coupe d'un poinçon (a) neuf, (b) usé.

2 Essais expérimentaux

2.1 Montage expérimental

Un outil de découpe totalement instrumenté a été monté sur une presse à découper de 60 tonnes (Figure 3).

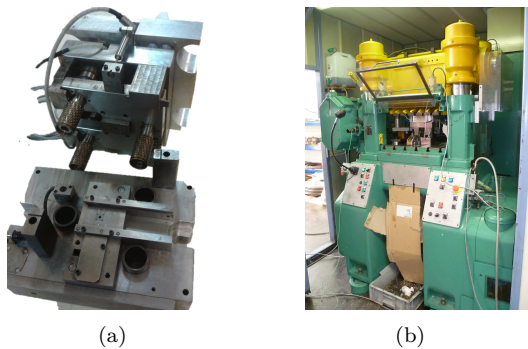


FIGURE 3 – (a) Outil de découpe. (b) Presse BTS-60H.

La forme découpée est un trou de 3.7 mm de diamètre réalisé dans de l'acier inoxydable. La figure 4 montre l'implantation des capteurs dans l'outil. La mesure de l'effort est réalisée à l'aide d'une cellule piezo électrique (KISTLER 9021A) placée au dessus du poinçon. Une jauge de déformation est collée sur celui-ci. L'acquisition des signaux d'effort et de déformation est réalisée à l'aide d'un module d'entrée analogique (Ni 9234) à une fréquence de 51.2 kHz. Un capteur de déplacement LVDT mesure le déplacement du bloc supérieur par rapport à la matrice à une fréquence de 4 kHz.

Lors de cet essai, deux tôles d'acier inoxydables de 0.5 mm d'épaisseur sont étudiées (Tôle 1 écrouie C1000 et Tôle 2 écrouie C1400). Deux cadences de presse différentes sont aussi analysées (300 coups/min et 100 cp/min).

2.2 Mesures d'efforts

Une mesure d'effort et de déformation est réalisée sur la Tôle 1 (Figure 5). Une fois la fissuration de la tôle effectuée (3 ms), l'effort fluctue durant 4 ms. Un effort

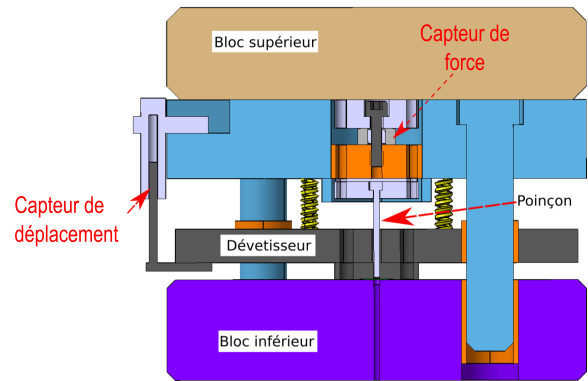


FIGURE 4 – Vue en coupe de l'outil utilisé.

positif est observé entre 7 ms et 16 ms à la descente du poinçon, puis, à partir de 18 ms l'effort est négatif car le poinçon fait marche arrière pour ressortir de la tôle. Cet effort est généré par le retour élastique de la tôle qui vient frotter sur le poinçon. La jauge de déformation ne mesure pas d'oscillations bien que sa bande passante le permette. Le poinçon n'entre donc pas en résonance. De plus le rapport de la déformation sur l'effort n'est pas constant. Il y a donc une raideur plus faible que celle du poinçon ($0.14 \text{ kN}/\mu\text{m}$ dans la chaîne d'acquisition).

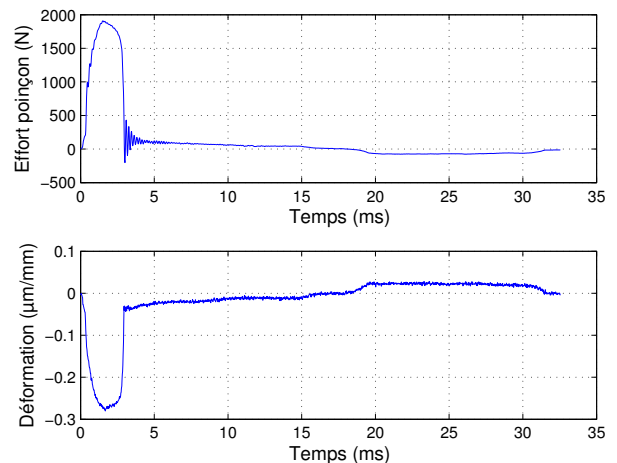


FIGURE 5 – Mesure de l'effort et de la déformation en fonction du temps lors du découpage.

2.3 Influence des paramètres de découpe

La mesure d'effort sur le poinçon est réalisée pour différentes configurations (Figure 6). Le découpage de la Tôle 1 génère des oscillations d'amplitudes plus faibles que la Tôle 2, plus fortement écrouie. En effet l'effort maximum de découpage étant plus fort pour la Tôle 2, cela provoque une détente plus forte des contraintes.

Une fois la pièce découpée, le frottement entre le poinçon et la tôle est plus important pour la Tôle 1 que pour la Tôle 2. Le retour élastique est donc plus important pour la première tôle. Des mesures dimensionnelles des perçages confirment cette hypothèse. Les diamètres des perçages de la Tôle 2 sont plus gros que le diamètre du poinçon. Le Tableau 1 regroupe les valeurs du diamètre de perçage, de la

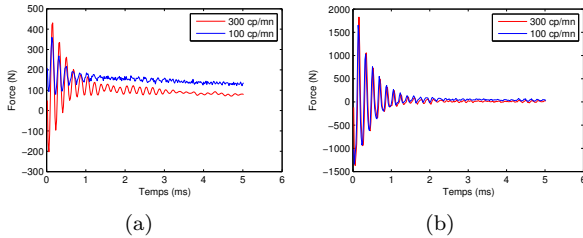


FIGURE 6 – Mesure de l'effort en fin de fissuration pour des cadences (a) Tôle 1, (b) Tôle 2.

durée du phénomène d'oscillation de l'effort et du nombre d'oscillations. Sur la Tôle 2, qui ne frotte pas sur le poinçon, le régime est libre et ne varie pas en fonction de la vitesse de coupe. Sur la tôle 1 le régime d'oscillations libres est entretenu plus longtemps sur les fortes cadences de frappe, car le diamètre des perçages est plus important à 300 cp/min. Les oscillations sont donc moins amorties pour les cadences élevées.

TABLEAU 1 – Diamètre de perçage, durée du phénomène d'oscillations dans l'outil et nombre de répétitions des oscillations.

	100 cp/min			300 cp/min		
	Φ (mm)	Durée (ms)	Nb de rep	Φ (mm)	Durée (ms)	Nb de rep
Tôle 1	3.690	3.16	17	3.696	10.9	60
Tôle 2	3.701	16.8	93	3.702	16.7	93

2.3.1 Traitement du signal

Une transformée de Fourier du signal d'effort permet de calculer la fréquence des vibrations du système poinçon/capteur. Pour chacune des différentes configurations, un mode à 5578 Hz est mesuré, ainsi que son harmonique (Figure 7). Les différentes conditions de découpage n'impactent pas la fréquence du mode vibratoire. L'amplitude quant à elle varie en fonction de la configuration de découpe. La cellule de force mesure donc une résonance dans l'outil.

2.3.2 Discussion

Après fissuration, l'ensemble capteur et poinçon qui était comprimé se détend et entre en résonance. L'objectif de la partie suivante est de connaître exactement le déplacement du poinçon car la mesure se fait ici entre le bloc supérieur et la matrice. Si les vibrations post-fissuration possèdent une amplitude importante, l'énergie dissipée dans le frottement ainsi que les paramètres tribologiques estimés pourront en être affectés. Gaudilliere et al.[6] montrent qu'il est possible de mesurer le déplacement du poinçon en visant le dessous de celui-ci avec un capteur laser lors de la découpe. La presse utilisée ne pouvant

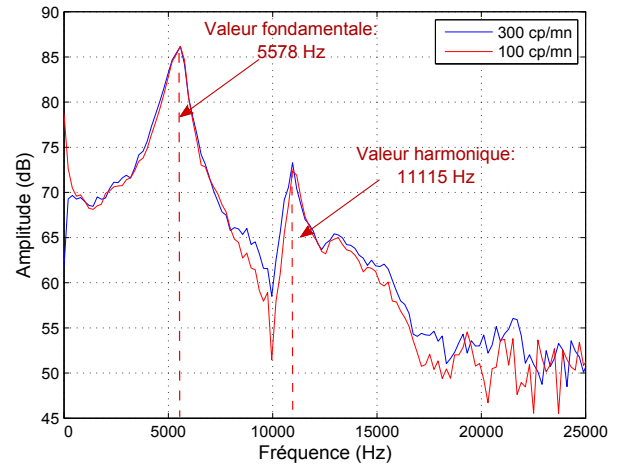


FIGURE 7 – Transformée de Fourier du signal du capteur de force sur la Tôle 2.

pas être équipée d'un tel dispositif, des mesures en laboratoire avec un vibromètre 3D sont réalisées afin de remonter à l'amplitude des oscillations du poinçon. Ces différentes configurations mettent en évidence l'impact des paramètres de découpe sur les vibrations mesurées sur la cellule piezo électrique.

2.4 Analyse modale

Afin d'étudier les différentes réponses en fréquence de l'ensemble capteur de force et poinçon, l'assemblage est analysé avec un vibromètre 3D (POLYTEC PSV 500). La connaissance de l'amplitude du déplacement du poinçon durant les oscillations de l'effort de découpe, permettra d'affiner la mesure de coefficient d'usure énergétique du poinçon. Une simulation numérique permet d'estimer la fréquence du premier mode de traction du poinçon aux alentours de 57 kHz. Ce n'est donc pas ce mode qui est excité par la libération de contraintes lors de la fissuration de la tôle. Quant aux modes de l'assemblage du capteur de force, ils sont difficiles à calculer étant donnée la complexité de l'assemblage. La mesure par vibromètre va permettre de les déterminer.

2.4.1 Montage expérimental

Le poinçon est fixé au bloc supérieur par l'intermédiaire d'un capteur piezo électrique pré-contraint (Figure 8).

Le bloc supérieur est posé sur des mousses, et l'excitation du montage se fait à l'aide d'un pot vibrant appliquant un effort de 15 N (Figure 9). Le pot vibrant n'est pas placé au centre du capteur pour des raisons de facilité de montage. Le signal imposé est un bruit blanc à bande de fréquence contrôlée entre 1 et 10 kHz. Les fréquences en dessous de 1 kHz ne sont pas générées car elles sollicitent les modes de corps rigide.

Un accéléromètre est fixé sur le capteur de force proche de l'excitation afin de la vérifier. L'acquisition des signaux du capteur de force et de l'accéléromètre est faite en même temps que la mesure de vibration. Pour des raisons de dimensions de pièces, les différents points

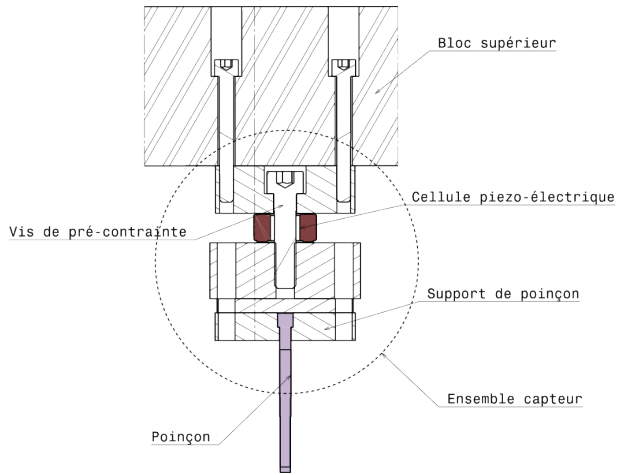


FIGURE 8 – Ensemble capteur de force/poinçon.

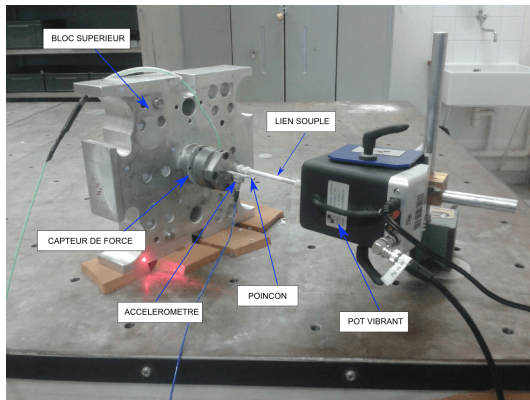


FIGURE 9 – Montage mesuré par le vibromètre 3D.

de mesure du vibromètre sont placés sur le support de poinçon. On considèrera que le déplacement du support est identique à celui du poinçon.

2.4.2 Résultats

Les vitesses dans les trois directions sont mesurées grâce aux trois têtes de mesures du vibromètre. La cohérence indique une bonne fiabilité des mesures entre 1 et 7 kHz. Au delà les vitesses sont trop faibles pour être mesurées correctement, le rapport signal/bruit étant trop élevé. Plusieurs modes sont observés sur la réponse fréquentielle du signal de déplacement, ainsi que sur la transformée de Fourier du capteur de force piezo électrique (Figure 10). Un pic à 5571 Hz est mesuré, il correspond à celui mesuré sur presse (section 2.1.3 (Figure 7)). Deux modes sont visibles à 1500 et 1700 Hz sur la FRF du vibromètre, mais ne sont pas présents sur la FFT du capteur de force. La modélisation (section 3) indique que ce sont les modes de flexion du poinçon. Deux modes prédominant sur la FRF du capteur de force, un à 3300 Hz et l'autre à 4280 Hz. Une visualisation des déplacements en 3 dimensions indique que le mode à 3300 Hz semble correspondre au mode de traction/compression de l'assemblage (section 3.2 Figure 13). Le mode à 4280 Hz est un mode de flexion du bloc supérieur. Le mode mesuré sur la presse (5578 Hz), semble être quant à lui un mode de flexion de la structure du capteur.

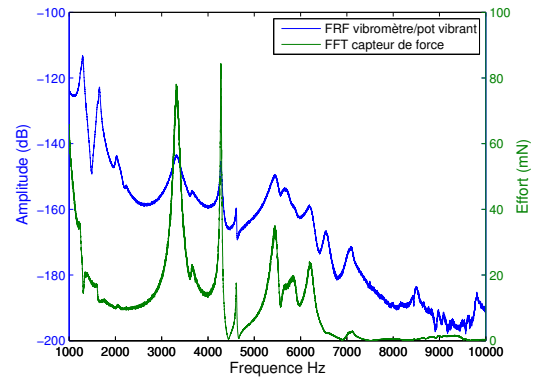


FIGURE 10 – FRF du déplacement du dessus du capteur de force (bleu). FFT du signal du capteur de force piezo-electrique (vert).

Une estimation de la raideur équivalente de l'ensemble est effectuée, pour le mode à 5571 Hz, la raideur équivalente est de 103 kN/mm. Il est donc possible d'estimer le déplacement du poinçon une fois la tôle fissurée (Figure 11). Cela se traduit par une ondulation qui vient s'ajouter à la descente du poinçon. Le déplacement cumulé du poinçon présente une asymptote après 8 ms d'oscillations (Figure 11). Cette stabilisation intervient après la fin des oscillations. Un comparatif des différentes distances parcourues en fonction des tôles découpées ainsi que des vitesses est donné en Figure 12.

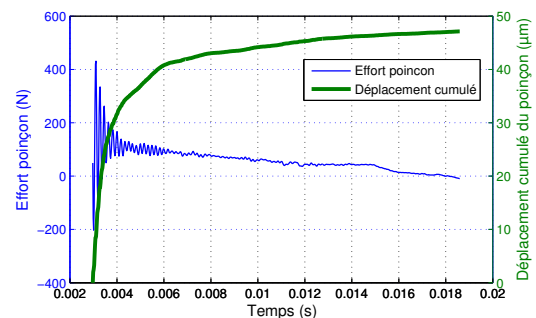


FIGURE 11 – Déplacement cumulé du poinçon et effort de coupe (Tôle 1, 300 cp/mm).

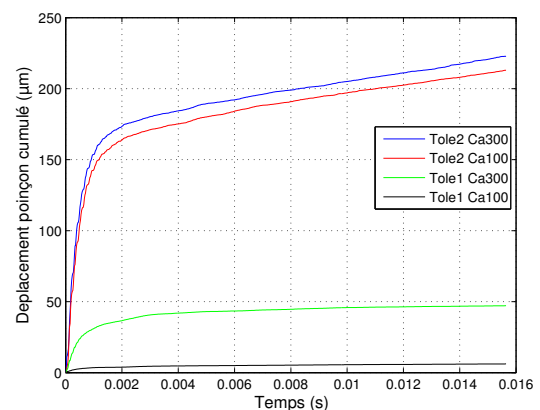


FIGURE 12 – Calcul du déplacement cumulé du poinçon pour différentes configurations de découpe.

La découpe de la Tôle 2 génère un déplacement cumulé de 200 µm par trou découpé. La distance

parcourue dans la tôle par le poinçon est augmentée de 20 %. C'est un paramètre dont il faudra tenir compte pour simuler la distance parcourue sur un essai tribologique. En effet la part d'énergie supplémentaire qui est ajoutée au cycle de découpe peut ainsi être calculée. Le tableau 2 donne une idée de la quantité d'énergie dissipée en plus dans les oscillations.

TABLEAU 2 – Energie dissipée (mJ) dans le frottement lors de la découpe et part à rajouter due aux oscillations.

	100 cp/min		300 cp/min	
	normale	dans les oscillations	normale	dans les oscillations
Tôle 1	50	9.4 (+18%)	40	6.6 (+16%)
Tôle 2	15	80 (+500%)	12	97 (+800%)

2.4.3 Discussion

La mesure des déplacements du porte poinçon en fonction de l'effort relevé permet de corriger les valeurs d'énergie dissipée calculées directement avec le déplacement mesuré par le capteur LVDT. Ainsi, la part d'énergie provoquée par les oscillations du poinçon s'avère potentiellement très importante. Cette mesure permet donc de corriger les coefficients d'usure énergétique qui étaient calculés auparavant seulement sur la courbe brute effort/déplacement.

3 Modélisation de l'assemblage

Une modélisation du capteur ainsi que du support de poinçon est réalisée sous Comsol Multiphysics® 5.0 afin de visualiser plus précisément les modes de vibration de l'ensemble. L'objectif final sera de modéliser complètement l'opération de découpage avec un montage déformable afin de reproduire précisément la notion d'énergie dissipée dans le frottement. En effet à l'heure actuelle, la plupart des simulations de découpage sont réalisées avec des outils considérés comme indéformables et ne tenant pas compte des vibrations présentes après la fissuration.

3.1 Modèle

Certains paramètres de l'assemblage du capteur de force ne sont pas connus. En effet celui-ci est pré-contraint par une vis passant au centre de la cellule piezo-électrique afin de visualiser des effort négatifs. Cette vis est modélisée ici par un ressort placé entre les deux blocs aux extrémités de la cellule et la pré-contrainte est simulée par un chargement sur frontière placé entre le bloc supérieur et le support de poinçon (Figure 8, section 2.4.1). La raideur du ressort est une variable à déterminer. Une autre variable du système est la cellule de force qui possède une raideur donnée par le constructeur de 3.4 kN/ μm . Pourtant des essais

de compression sur le capteur ont montré que la raideur était plutôt de 0.9 kN/ μm . Cette valeur correspond à un module d'Young équivalent de la cellule, de 28.9 GPa.

3.2 Résultats

Afin de reproduire le maximum de modes par rapport à l'expérimentation, différentes configurations sont testées. Une raideur de la cellule piezo électrique de 0.7 kN/ μm doit être appliquée. La valeur de la pré-contrainte est de 6 kN. Quant à la raideur du ressort placé de part et d'autre de la cellule piezo électrique est de 0.527 kN/ μm et correspond à la raideur d'une vis M8. Les premiers modes correspondent bien aux modes visualisés sur le vibromètre (Figure 13). Seul le mode de traction de l'ensemble capteur piezo électrique ne correspond pas au mode mesuré sur le vibromètre. Il faudrait appliquer une raideur plus forte de la cellule de force pour retrouver le mode à 3300 Hz. La géométrie de la cellule piezo électrique devra donc être modifiée afin de reproduire les modes mesurés.

3.3 Discussion

Pour modéliser correctement l'expérimentation modale, il faut modifier les données du fabricant de la cellule piezo électrique. Le mode de flexion du bloc supérieur correspond à celui mesuré. La fréquence de résonance mesurée sur presse à bien visible et correspond à une flexion de l'assemblage du capteur piezo électrique. Par la suite une nouvelle géométrie devra être appliquée à la cellule de force afin de corriger le mode de traction de celle-ci. Une fois la chaîne de montage du poinçon modélisée correctement, il sera possible d'appliquer un choc en bout de poinçon (reproduisant la fissuration de la tôle) et de voir la résonance mesurée sur presse est observée.

4 Conclusion

L'observation des vibrations lors du découpage a permis de mettre en évidence un nombre d'oscillations du poinçon assez important une fois la fissuration de la tôle faite. L'amplitude de ces oscillations est fonction des paramètres de découpe, alors que la fréquence reste la même. La nuance de tôle ainsi que la vitesse de découpe ont aussi une influence sur le nombre de répétitions des oscillations. Il devient donc possible d'établir un cahier des charges pour conduire des essais de fatigue sur les matériaux d'outil. De plus ces oscillations étant de faible amplitude ($<2 \mu\text{m}$) les conditions tribologiques se rapproche du fretting après la fissuration. Quant à l'analyse modale, elle a permis de mettre en évidence le fait que le mode prédominant lors du découpage sur presse est un mode de flexion du capteur d'efforts. Il a été possible d'évaluer l'amplitude du déplacement de l'arête de coupe du poinçon pour corriger la mesure d'énergie dissipée dans le frottement entre la tôle et le poinçon. Ainsi le coefficient d'usure énergétique peut être évalué avec plus de précision. De plus des essais tribologiques pourront être ainsi mieux définis afin de s'affranchir

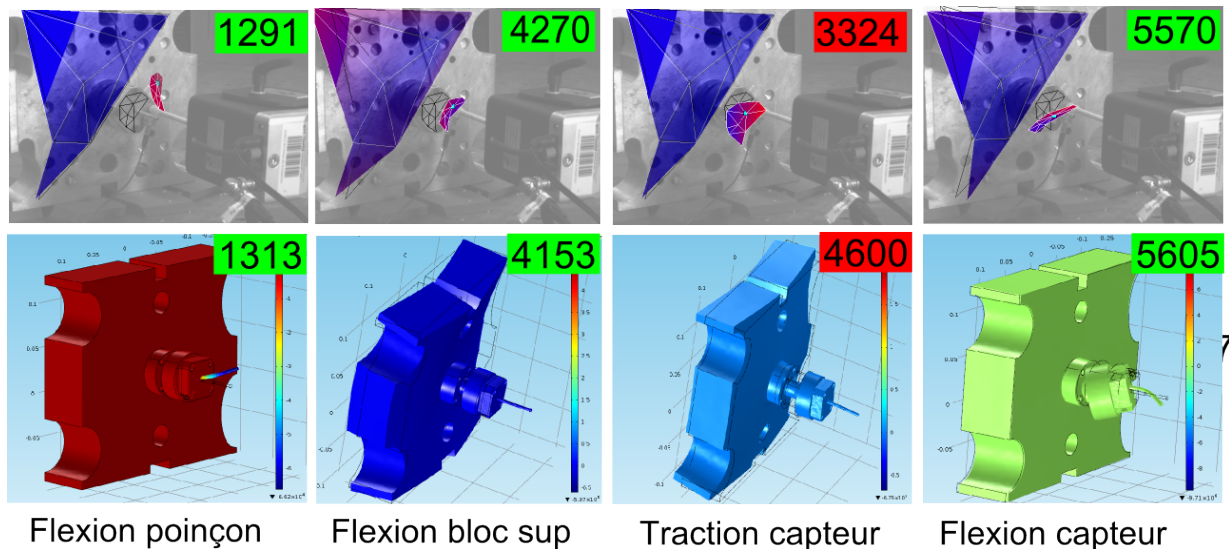


FIGURE 13 – Corrélation entre les modes visualisés sur vibromètre et les modes simulés.

d'essais sur presse. Enfin, il sera possible de rentrer tous ces paramètres dans une simulation de l'opération de découpe pour évaluer la durée de vie de l'outillage. L'outil de découpe utilisé pour cette étude est différent d'un outil industriel puisque il a été démontré que la chaîne de mesure de l'effort du poinçon possède une raideur plus faible que celle du poinçon. Les mesures de déplacement supplémentaire, induit par les oscillations post-fissuration, ne sont pas valables pour un outil non instrumenté. La modélisation d'un outil industriel permettra de voir si le poinçon entre en résonance, et si cela est le cas, une estimation l'amplitude des oscillations pourra être effectuée.

Remerciements

Nous remercions le Conseil Général du Doubs (CG25), la Région Franche-Comté, la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon (CAGB), et le FEDER pour le financement de ces travaux dans le cadre du projet DEQUALC (Découpage, Qualité, Compétitivité).

Références

- [1] André Maillard. *Etude expérimentale et théorique du découpage*. PhD thesis, 1991.
- [2] Jacek Mucha. An experimental analysis of effects of various material tool's wear on burr during generator sheets blanking. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50(5-8) :495–507, 2010.
- [3] Hamid Makich. *Etude théorique et expérimentale de l'usure des outils de découpe : influence sur la qualité des pièces découpées*. PhD thesis, Université de Franche-Comté, 2011.
- [4] Edouard Falconnet, Hamid Makich, J Chambert, G Monteil, and P Picart. Numerical and experimental analyses of punch wear in the blanking

of copper alloy thin sheet. *Wear*, 296(1) :598–606, 2012.

- [5] B Guo, WM Chen, and ZR Wang. Analysis of blanking vibration with consideration of the break-through state. *Journal of Materials Processing Technology*, 75(1) :117–121, 1998.
- [6] Camille Gaudilliere, Nicolas Ranc, Arnaud Larue, A Maillard, and Philippe Lorong. High speed blanking : an experimental method to measure induced cutting forces. *Experimental Mechanics*, 53(7) :1117–1126, 2013.
- [7] A Ghiotti, P Regazzo, S Bruschi, and PF Bariani. Reduction of vibrations in blanking by mr dampers. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 59(1) :275–278, 2010.
- [8] E Doege and H-J Seidel. Noise reduction on mechanical punch presses. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 34(1) :507–509, 1985.