

## **L'Usinage: du procédé au matériau**

X. Soldani – Universidad Carlos III de Madrid (Spain) –

M. Carmen Vazquez Garcia – Universidad Carlos III de Madrid (Spain) –

### INTRODUCTION

La mise en forme des matériaux par usinage tient une part prépondérante dans l'industrie et la recherche scientifique mondiale puisqu'elle représente en moyenne 3% du PIB des pays industrialisés.

L'usinage concerne de nombreux domaines d'activités tels que l'automobile, l'aéronautique ou l'électronique et s'applique à presque tous les matériaux existants (métaux, alliages, polymères, verre, matériaux composites, bois, os, ...).

Les problématiques naissantes à la fois du procédé, mais aussi du couple outil/matériau usiné sont ainsi extrêmement nombreuses et variées (endommagement – mécanique et thermique – des matériaux usinés, usure des outils, énergie nécessaire à la mise en forme de matériaux ultra résistants, frottement à l'interface pièce usinée/outil, température du procédé, contraintes résiduelles induites à la pièce usinée, vibrations, ...) et offrent donc de multiples axes de recherche.

Pour chaque nouveau procédé, matériau usiné ou nouvel outil de coupe, de nombreuses et coûteuses campagnes d'essais expérimentaux sont nécessaires. Les chercheurs proposent donc de minimiser le nombre de ces essais en modélisant l'ensemble « procédé-matériau-outil ». Les trois types de modélisation – mécanistique, analytique et numérique – sont régulièrement utilisés afin de répondre à certaines des problématiques citées auparavant.

On se propose ici de présenter différentes méthodes de modélisation de l'usinage à grande vitesse des métaux, de la découpe des matériaux composites employés dans l'aéronautique ainsi qu'un premier travail sur l'usinage (et l'endommagement induit) des os .

### A/ USINAGE A GRANDE VITESSE DES METAUX ET BASES DE LA MODÉLISATION

A partir de la fin des années 1980, et jusqu'à ce jour, les vitesses de coupe en usinage n'ont cessé d'augmenter, donnant ainsi un sens à la terminologie « Usinage à grande Vitesse (UGV) ». Prenant pour exemple le cas de l'acier, les vitesses de coupe sont passées de 10-50 m/min à plus de 1000 m/min augmentant ainsi la productivité des machines-outils. L'augmentation de la vitesse du procédé a été rendu possible par l'amélioration des machines (moteur plus puissant, broches plus résistantes, ...) mais surtout grâce aux nouveaux matériaux de coupe (matériaux des plaquettes, revêtements permettant l'évacuation de la chaleur induite, résistance à l'usure, ...).

La formation du copeau à grande vitesse offre ainsi de multiples problématiques aux chercheurs.

Les hautes vitesses de coupe induisent une forte température au cours procédé. En UGV, à l'interface outil-copeau (Figure 1), la température peut facilement atteindre la température de fusion du matériau usiné. Les outils classiques sans revêtement, ne pouvant supporter de telles températures, s'usent en quelques secondes. Au cours des dernières décennies les matériaux des outils de coupe se sont ainsi considérablement développés induisant une détermination nouvelle des conditions de coupe optimales. Pour palier à ces besoins, les chercheurs proposent ce que l'on appelle des modèles prédictifs. Ces derniers permettent, entre autres, de déterminer les conditions de coupe pour un couple « outil/matériau usiné », de prédire l'énergie nécessaire à la découpe, la température de l'outil ou encore leur usure en fonction des paramètres matériaux et procédé.

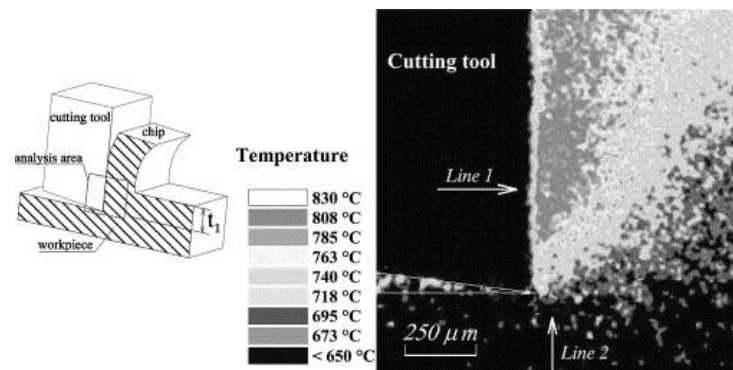


Figure 1 : Distribution de température à l'interface outil/copeau, mesurée à l'aide d'une caméra thermique lors de la coupe orthogonale du matériau 42CD4 (essai réalisé à 20 m/s). [1]

L'approche mécanistique est utilisée pour définir des modèles simples basés sur des observations expérimentales. Les lois physiques sont dans ce cas remplacées par des considérations phénoménologiques, calibrées à partir d'essais expérimentaux. Il s'avère en outre que ce type d'approche (dans le cas de l'usinage) est intrinsèquement lié au couple « outil /matière usiné » et nécessite de nombreux essais expérimentaux.

Les approches numériques modélisant les procédés de coupe sont de plus en plus utilisées ces dernières années. L'évolution permanente des machines de calcul, le développement de méthodes numériques avec remaillage automatique ou sans maillage, permettent de réduire considérablement les temps de calcul pour des opérations de coupe simples. Néanmoins, la modélisation des procédés dits « industriels » tels que le fraisage ou le perçage induit encore aujourd'hui des temps de calculs très élevés.

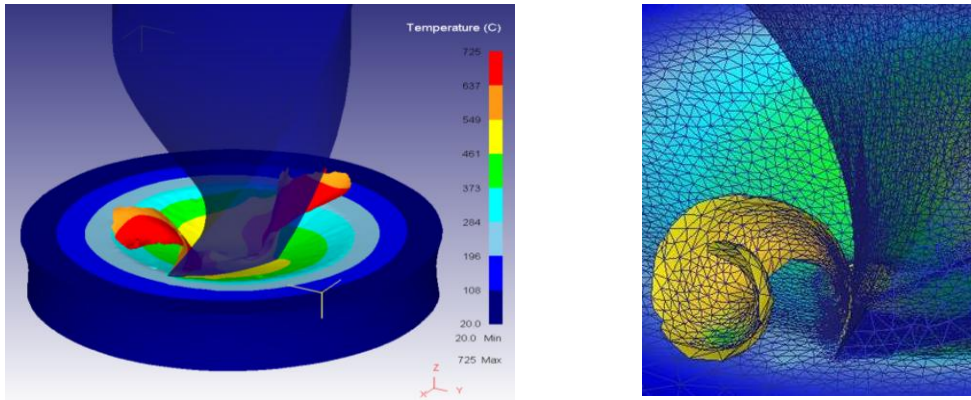


Figure 2: Simulations numériques du perçage de Ti6Al4V réalisées sous *DEFORM 3D*. (Temps de calcul moyen - avec remaillage automatique - entre 15 et 60 jours) [2]

L'approche analytique permet à l'aide de considérations mécaniques simples, d'étudier les phénomènes thermomécaniques des procédés de coupe les plus complexes tels que le fraisage, le tournage ou le perçage.

Ces différentes approches, couplées à des modèles d'usure [3-8], peuvent permettre de prédire la durée de vie utile des outils, ou déterminer les meilleures conditions de coupe pour un couple outil/matériau usiné donné.

Les modèles prédictifs nécessitent un minimum d'essais expérimentaux afin de déterminer certains paramètres (le comportement du matériau dans les conditions de température et de vitesse de l'usinage, le frottement, l'angle de cisaillement ou encore l'émissivité du matériau). Selon le type de modèle (mécanistique, analytique ou numérique) le nombre d'essais expérimentaux nécessaire à sa calibration varie.

## B/ USINAGE DES MATERIAUX COMPOSITES

On s'intéresse ici à l'usinage des matériaux de type *LFRP* (Long Fiber Reinforced Polymer). Ces composites à matrice *Epoxy* renforcés de fibres de verre (*GFRP*) ou de carbone (*CFRP*) sont hautement utilisés dans le secteur aéronautique. Bien que le moulage de ces matériaux se veuille être le plus proche de la forme finale de la pièce voulue, les opérations d'usinage sont un passage quasi-obligatoire. Les plus courantes pour ces matériaux sont celles de fraisage et perçage. Les phénomènes de délamination (séparation des couches de fibres selon leur orientation, Figures 3-4-5) ou de décohésion entre les fibres et la matrice peuvent apparaître lors de l'usinage des *LFRP*.

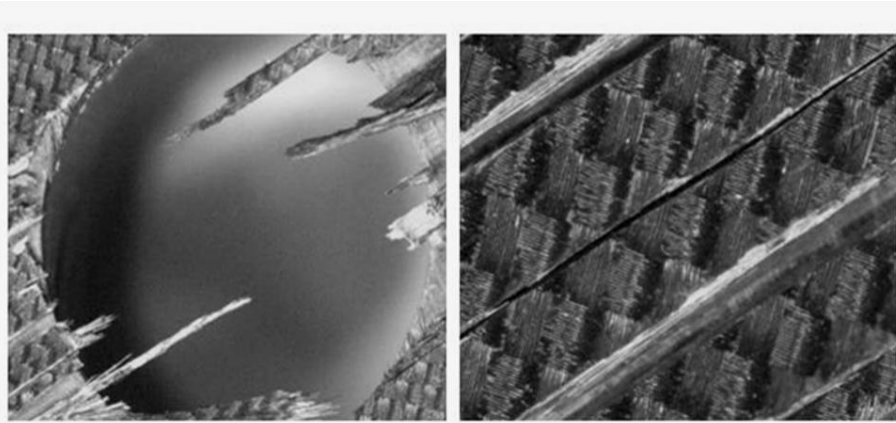


Figure 3: Delamination après perçage de couches de fibres de carbone tissés à une vitesse excessive d'avance d'outil (tests réalisés à la *Technical Engineering School*, Université de Cadiz, Espagne -Prof. M. Marcos).

Les premiers modèles de perçage de matériaux composites ne permettaient pas la rotation de l'outil. Le seul mouvement de pénétration de la broche dans la matière était alors défini. Les résultats ont montré que ces modèles surestiment la prédiction de la délamination induite. Récemment des modèles complets du procédé de perçage, incluant le mouvement de rotation de la broche, la pénétration de l'outil dans le composite et l'érosion des éléments ayant subi de fortes déformations ont été publiés [9-11]. Le coût computationnel de ces modèles dits "complets" devient alors extrêmement lourd devant les "modèles simplifiés", néanmoins, leur précision a été grandement accrue.

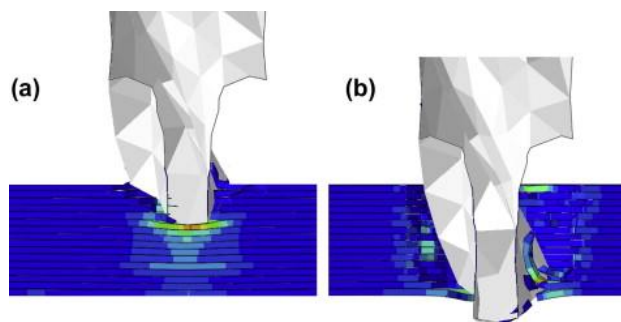


Figure 4: Simulation numérique du perçage avec un modèle complet développé sous ABAQUS Explicit. La vitesse de rotation est de 2500 rev/min et la vitesse de pénétration comprise entre 2.5 et 8.3 mm/s. (Temps de calcul moyen entre 4 et 20 jours) [12]

La figure 5 montre les résultats d'une simulation numérique 3D, développée sous ABAQUS Explicit, de l'usinage du matériau composite *Carbon epoxy T300/914*. Les différents modes d'endommagement subit par le matériau lors du procédé de coupe orthogonale sont ici présentés. Selon l'orientation des plis du matériau composite, l'endommagement induit peut énormément varier, imposant d'avoir à redéfinir les conditions de coupe pour chacun des empilements [12-16].

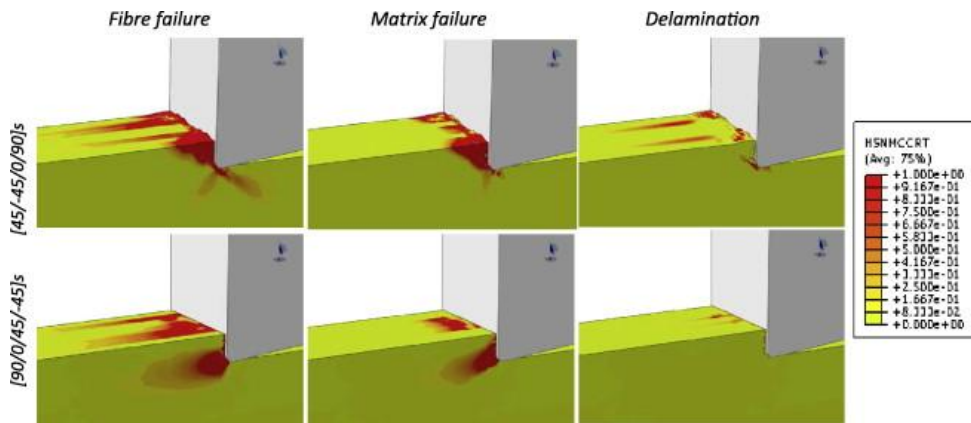


Figure 5: Endommagement induit lors de l'usinage de Glass FRP, pour deux séquences des plis ([90/0/45/-45]s et 45/-45/0/90]s) [15-16].

Dans le paragraphe précédent, on a pu souligner les importantes températures induites par l'usinage. On rappellera également que l'un des secteurs utilisant le plus ce type de matériaux est l'industrie aéronautique. Dans ce cas, on peut facilement imaginer l'endommagement occasionné par ces températures sur la matrice de polymère lors du perçage d'une aile d'avion. Une aile d'avion est en effet composée de deux « blocs » d'alliage de titane et de CFRP, unis par des rivets. Les températures générées par la découpe de l'alliage de Titane peuvent ainsi se propager dans le bloc de composite entraînant un endommagement thermique, avant une possible rupture catastrophique de l'ensemble.

Nous proposons par la suite de déterminer l'élévation de température dans le matériau composite (Figure 6) après qu'il a subi une opération d'usinage. Pour se faire, une combinaison de calculs *Explicit* (pour simuler la coupe) puis *Implicit* (pour refroidir le matériau et laisser la conduction thermique jouer son rôle) a été réalisée. Les résultats montrent que dans le CFRP la température peut facilement avoisiner les 200-300°C selon la vitesse de coupe du procédé (la matrice *Epoxy* pouvant résister jusqu'à des températures comprises entre 120 et 150°C).

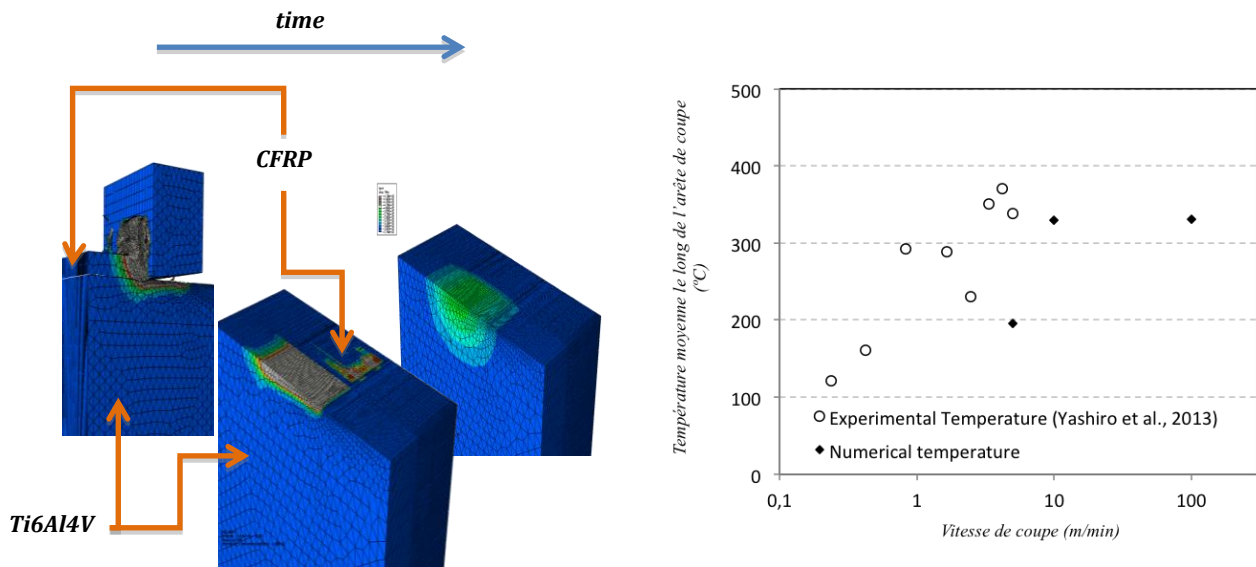


Figure 6: Propagation de la température induite par l'usinage d'un ensemble de Ti6Al4V - CFRP à une vitesse de coupe  $V=100$  m/min et un coefficient de frottement de 0.5 [17]

### C/ APPLICATIONS PARALLÈLES



Figure 5: Usinage d'os utilisant différentes avances de coupe (10, 50, 80  $\mu\text{m}$ ) [18]

En chirurgie, il est parfois nécessaire d'effectuer de petites opérations d'usinage sur les os afin de poser une vis ou de le remplacer par une prothèse. La température durant la coupe des os doit être relativement basse pour éviter tout endommagement des cellules (on estime l'apparition de cellules sclérosées à partie de 50°C environ). Le contrôle des paramètres de coupe, ainsi que la prédiction de la température deviennent alors un enjeu fondamental.

Les mesures expérimentales de température lors de l'usinage peuvent être extrêmement difficile à réaliser. En effet, la zone thermiquement affectée est très restreinte, offrant un accès limité, et le gradient de température très élevé (Figure 1). Les méthodes de mesure les plus employées restent la caméra thermique et le thermocouple. Bien que les thermocouples soient peu coûteux et faciles d'utilisation, ils ont quelques désavantages : ils peuvent interférer avec le flux de chaleur, ont une faible réponse transitoire, la détermination du gradient de température est presque impossible due et le contact entre le thermocouple et la pièce usinée est nécessaire.

Une nouvelle méthode de mesure sans contact par fibre optique, mais avec une plus ample précision que la caméra thermique est présentée Figure 6.

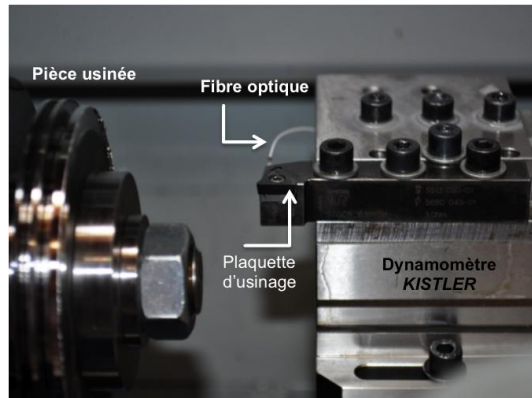


Figure 6 : mesure de température par fibre optique lors d'une opération de tournage [19]

Les premiers résultats de température obtenus lors de l'usinage de métaux ont montré une excellente corrélation avec d'autres systèmes de mesure à partir d'une valeur palier de 200°C. Une parfaite connaissance de l'émissivité du corps osseux (pour des températures inférieures à celles des premières apparitions de cellule sclérosées) nous permettrait de mesurer sans contact, la température induite par la fraise ou la broche lors de procédé de coupe dans et autour de la zone usinée [19].

#### D/ REFERENCES

[1] G. Sutter, L. Faure, A. Molinari, N. Ranc, V. Pina, (2003) An experimental technique for the measurement of temperature fields for the orthogonal cutting in high speed machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 671-678

[2] J. De La Cruz Hernández, J.L. Cantero Guisández, J. Díaz Álvarez, M.H. Miguélez Garrido, Análisis de estrategias de mallado para modelizar en 3D procesos de taladrado en Ti6Al4V, *XIX Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Castellón*.

[3] H. Takeyama, R. Murata, (1963) Basic investigation of tool wear, *J. of Engr for Indust.*, 33-38

[4] Subramanian S.V., Ingle S.S., Kay D.A.R., (1993) Design of coatings to minimize tool crater wear, *Surf Coat. Tech.* 61, 293-299

[5] Loladze T.N., (1962) Adhesion and diffusion wear in metal cutting, *Mechanical engineering division in: Proceedings of the 42nd annual convention, Calcutta, West Bengal*, 108-141.

[6] Kaur I., Gust W., Kosma L., (1989) *Handbook of Grain and Interphase Boundary Diffusion Data, Vols. 1 and 2*, Ziegler Press, Stuttgart

[7] Battacharyya A., Ghosh A., (1968) Diffusion wear of cutting tools, *Annals of C.I.R.P* XVI 369-375

- [8] X. Soldani, (2008) Modélisation analytique de l'usinage à grande vitesse et étude de l'usure en cratère – application au tournage. *Thèse doctorale*
- [9] Phadnis VA, Makhdum F, Roy A, Silberschmidt VV. (2013) Drilling in carbon/epoxy composites: experimental investigations and finite element implementation. *Compos A Appl Sci Manuf* 47:41–51.
- [10] Isbilir O, Ghassemieh E. (2013) Numerical investigation of the effects of drill geometry on drilling induced delamination of carbon fiber reinforced composites. *Compos Struct* ; 105:126–33.
- [11] N. Feito a, J. López-Puente b, C. Santiuste b, M.H. Miguélez (2014) Numerical prediction of delamination in CFRP drilling, *Composite Structures* 108, 677–683
- [12] Santiuste C, Soldani X, Miguélez H. Machining FEM model of long fiber composites for aeronautical components. *Compos Struct* 2010; 92:691–8.
- [13] Soldani X, Santiuste C, Muñoz-Sánchez A, Miguélez H. Influence of tool geometry and numerical parameters when modelling orthogonal cutting of LFRP composites. *Compos A Appl Sci Manuf* 2011; 42:1205–16.
- [14] C. Santiuste, X. Soldani, J. López-Puente, M.H. Miguélez, (2011) Analysis of dynamic loading of long fiber reinforced composites , en: *Fiber-Reinforced Composites* , NOVA PUBLISHERS, pp. 497-526.
- [15] C. Santiuste,, M.H. Miguélez, X. Soldani (2011) Out-of-plane failure mechanisms in LFRP composite cutting, *Compos Struct*; 93:2706–13.
- [16] C. Santiuste, A. Olmedo, X. Soldani, M.H. Miguélez (2012), Delamination prediction in orthogonal machining of carbon long fiber-reinforced polymer composites, *J. Reinf Plast Compos*; 31(13):875–85.
- [17] C. Santiuste, J. Diaz-Alvarez, X. Soldani, M.H. Miguélez, (2014) Modelling thermal effects in machining of carbon fiber reinforced polymer composites, *J. Reinf Plast Compos*;
- [18] Naohiko Sugita, Kentaro Ishii, Jianbo Sui, Makoto Terashima, (2014) Multi-grooved cutting tool to reduce cutting force and temperature during bone machining, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63 101–104.
- [19] A. Tapetado, C. Vázquez, X. Soldani, H. Miguélez, D. S. Montero, (2012) Temperature sensor based on fiber optic pyrometer in material removal processes, *22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, China*.

## E/ Remerciements

grant TEC2012-37983-C03-02 of Spanish Ministry of Economía y Competitividad titulado Nuevas técnicas Fotónicas de Transmisión, monitorización y sensado en redes de banda ancha de bajo consumo