



Proposition de thèse CIFRE

CDD de 36 mois en convention CIFRE / 2700 € brut/mois.

Etude des mécanismes d'usure des outils et de dégradation des pièces lors du perçage des empilages Ti6Al4V/CFRP

Entreprise : Tivoly

Laboratoire : LaBoMaP (Arts et Métiers Campus de Cluny)

Contact entreprise : raphael.lorain@tivoly.com

Contact laboratoire : gerard.poulachon@ensam.eu

Entreprise :

TIVOLY est un groupe industriel qui a pour vocation la conception, la production et la commercialisation d'outils de coupe et de produits et services associés, destinés aux industriels, aux professionnels de la fabrication et de la maintenance, aux artisans et aux particuliers.

La société TIVOLY est implantée en France, en Espagne, au Royaume-Uni, en Chine, au Mexique et aux Etats-Unis. Ainsi, TIVOLY est un groupe rassemblant plus de 600 collaborateurs à travers le monde, pour un chiffre d'affaire de plus de 80 M€.

Forte d'une expérience centenaire, TIVOLY s'engage autour de trois axes de développement :

- Expansions géographique
- Excellence manufacturing
- Créativité & Innovation

Contexte :

Les contraintes environnementales appliquées à l'industrie du transport et en particulier au secteur aéronautique imposent aux constructeurs une recherche permanente de réduction de la masse des avions. Cette recherche d'allègement des structures conduit les avionneurs à utiliser de plus en plus d'alliages de titane et de matériaux composites pour la réalisation de ces aéronefs.

De plus, ces deux matériaux, aux caractéristiques mécaniques complémentaires, sont de plus en plus souvent associés sous forme d'empilages. Le maintien en position des différentes couches constituant ces empilages est assuré par des assemblages rivetés ou boulonnés. Il est donc nécessaire de réaliser les opérations de perçage, et ce de manière consécutive pendant la même opération, avec le même foret. Cependant, ces deux matériaux étant de nature très différente, les mécanismes de coupe associés le sont également. Il en résulte une dégradation très rapide de l'outil, induisant la formation de défauts sur les pièces obtenues:

- Bavures en entrée et sortie de Ti6Al4V ;
- Brûlures à l'interface Ti6Al4V/CFRP ;
- Fibres non-coupées dans le CFRP ;
- Délaminage en sortie de CFRP ;
- Modification de la cote diamétrale le long de l'axe du perçage.

Malgré la multiplication de cette configuration de perçage dans l'industrie, il n'existe pas à ce jour de procédé de perçage permettant de réaliser cette opération avec une bonne performance économique.

Objectif de la thèse :

Le sujet proposé a pour objectif d'étudier comment les mécanismes de coupe, d'usure de l'outil et de formation des défauts sont affectés en fonction des paramètres définissant le procédé de perçage, à savoir :

- L'outil (géométrie, substrat, revêtement) ;
- Le mode de lubrification ;
- La cinématique de l'opération (perçage conventionnel, perçage vibratoire) ;
- Les conditions opératoires.

Finalement, les clés de compréhension obtenues pendant la thèse devront conduire à la mise au point d'une nouvelle technique de perçage conduisant à un gap significatif en terme de performance économique pour les clients de TIVOLY (diminution du ratio(€)/nb. trous).

Projet scientifique :

Les alliages de titane, et en particulier l'alliage Ti6Al4V couramment utilisé dans le secteur aéronautique, sont réputés être des matériaux à faible usinabilité. Ces problématiques sont d'autant plus prégnantes en perçage du fait que cette opération est confinée, ce qui complique l'évacuation des calories générées par la coupe, et que le contact outil/paroi est un système tribologique fermé.

Les fortes sollicitations thermiques associées à l'usinage de cette famille de matériau sont dues à deux aspects :

- Les caractéristiques mécaniques des alliages de titane restent élevées jusqu'à 800°C. Associé à la grande ductilité de ces matériaux, cela implique une quantité d'énergie importante pour couper le matériau ;
- Le caractère réfractaire de ces alliages, limitant la diffusion de la puissance thermique générée par la coupe et le frottement des listels, entraînent une très forte augmentation des températures dans et autour de la zone de coupe.

De plus, l'attractivité chimique du titane est activée thermiquement. On observe des modes de dégradation des outils en carbure de tungstène et du liant cobalt par une diffusion de la matrice cobalt dans le titane. Cette attractivité chimique favorise une forte adhésion du titane sur l'outil, en particulier sur les listels, conduisant à une détérioration des conditions de frottement outil/paroi, et une dégradation de la surface des trous.

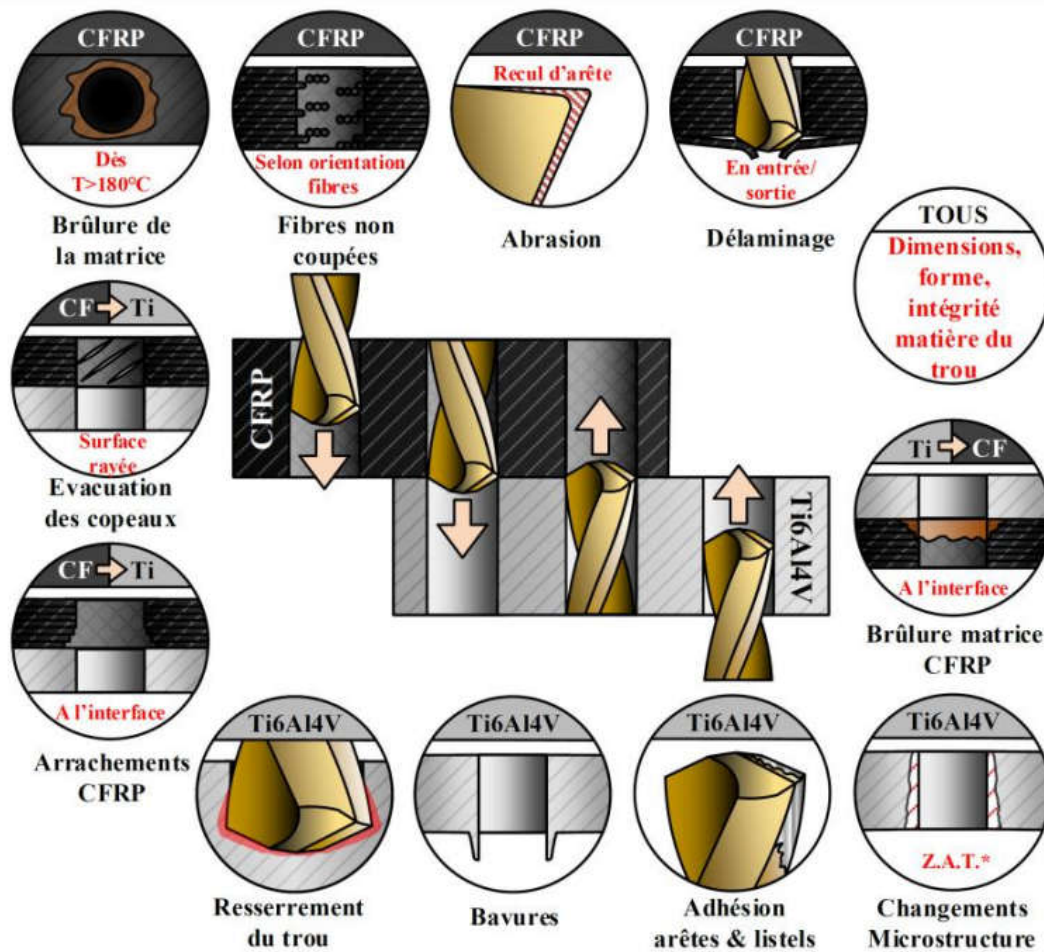
La grande ductilité du titane nuit à la fragmentation du copeau, ce qui est critique en perçage pour la bonne évacuation de celui-ci et de la chaleur qu'il contient.

Fort de ce constat, l'usinage des alliages de titane requiert l'utilisation d'outils et de conditions opératoires spécifiques :

- Une vitesse de coupe faible afin de limiter la puissance thermique émise et laisser le temps à la chaleur de diffuser en dehors de la zone de coupe ;
- Une vitesse d'avance élevée afin de limiter le nombre de passage successifs des listels sur la paroi des trous ;
- L'impossibilité de percer à sec ;
- Une macro et micro géométrie de coupe saillante (faible taillant, faible rayon d'arête) ;
- Un matériau constituant l'outil ayant une très bonne tenue mécanique, une faible propension à diffuser dans le titane et conservant ses caractéristiques à chaud.

Ces paramètres doivent être maîtrisés afin d'assurer une bonne qualité de trou, à savoir :

- Une bonne qualité dimensionnelle : diamètre, cylindricité ;
- Des bavures faibles ;
- Une bonne intégrité matière.



* Z.A.T. : Zone Affectée Thermiquement

Figure 1 Défauts identifiés lors du perçage d'empilages Ti/CFRP [Merzouki 2018]

Les mécanismes de coupe et de dégradation des outils dans les composites de type CFRP sont totalement différents de ceux rencontrés lors de l'usinage des matériaux métalliques et en particulier les alliages de titane. Ces matériaux se classent également dans la catégorie des matériaux à faible usinabilité, en particulier à cause du caractère hautement abrasif des fibres de carbone. Il en résulte une dégradation très rapide des outils conventionnellement utilisés en usinage (outils en carbure de tungstène ou en acier rapide). Cette usure par abrasion tend à diminuer le pouvoir coupant des outils, en particulier à cause de l'érouissage du tranchant des outils et de la modification locale de la conicité arrière associée aux listels. Ainsi, l'usinage de ces matériaux implique l'utilisation d'outils ayant une très forte résistance à l'abrasion, comme les outils en PCD ou en carbure avec un revêtement diamant.

Les conditions opératoires nécessaires à l'usinage des CFRP sont en totale contradiction avec celles recommandées pour l'usinage des alliages de titane :

- Une vitesse de coupe élevée ;
- Une vitesse d'avance faible ;
- Usinage à sec.

Ainsi, les domaines de fonctionnement des outils pour l'usinage de ces matériaux en perçage conventionnel sont disjoints.

Les mécanismes de coupe étant différents, les types de défauts rencontrés le sont également. Ainsi, pour assurer la fonctionnalité des perçages, il est nécessaire de limiter les défauts tels que :

- Le délaminage des fibres de carbone ;
- Les brûlures de la matrice époxyde ;
- Les fibres non-coupées à l'intérieur des trous.

Enfin, de nouveaux défauts apparaissent lorsque l'on considère le perçage de ces deux matériaux de manière successive sous la forme d'empilage :

- Brûlures de la matrice époxyde à l'interface entre le CFRP et le titane ;
- Arrachement des fibres et rayures des parois à cause de l'évacuation des copeaux de titane au travers du CFRP.

Enfin, la durabilité des outils est fortement réduite lorsque l'on considère le perçage de ces matériaux par le même outil. Les températures et les chargements mécaniques appliqués sur l'outil lors de l'usinage des alliages de titane empêchent l'utilisation d'outils ayant une forte résistance à l'abrasion tels que les outils PCD et les revêtements diamant. Les outils utilisés subissent donc une forte usure lors du passage dans le CFRP. Cette usure dégrade le pouvoir coupant de l'outil dans le titane, accentuant la production de chaleur. De ce fait, les bavures dans le titane, l'adhésion, les brûlures de la matrice époxy, et la dégradation de l'intégrité matière des matériaux percés interviennent très rapidement, conduisant à des durées de vies des outils très dégradés.

Seul un changement profond des mécanismes à l'œuvre lors du perçage de ces matériaux sont à même de rendre leur usinage moins antinomique. Ces dernières années, des modifications ont été proposées et ont permis d'améliorer les conditions de perçage, comme l'utilisation du perçage vibratoire, permettant de passer d'une situation de coupe continue à une coupe discontinue. La diminution des températures atteintes lors de l'utilisation du perçage vibratoire a permis de passer un premier cap pour l'usinage de ces matériaux.

La première étape de la thèse proposée consistera à élaborer une étude bibliographique détaillée sur les différents leviers d'action permettant de modifier les mécanismes ayant lieu lors du procédé de perçage des empilages titane/CFRP.

Suite à cette étude, une démarche expérimentale sera mise en place afin d'étudier finement l'évolution du triptyque effort de perçage – usure de l'outil – formation des défauts, lors d'une situation de perçage des empilages dans la situation conventionnelle :

- Outil en carbure de tungstène à liant cobalt
- Machine à commande numérique
- Lubrification MQL

Cela dans un empilage de 10 mm de titane et 10 mm de CFRP, dans le sens titane/CFRP et dans le sens CFRP/titane.

Une démarche de modélisation sera mise en œuvre sur la base des observations effectués lors de cette expérience afin de corrélérer l'usure de l'outil avec l'évolution des chargements thermomécaniques sur l'outil et la pièce. De là, une modélisation de la formation des bavures dans le titane et du délaminage dans le CFRP en fonction de l'usure de l'outil sera mise en place.

Cette approche couplant démarche expérimentale et modélisation permettra de valider la compréhension des mécanismes sous-jacents du procédé et d'identifier les paramètres clefs permettant de les influencer.

A partir de l'analyse bibliographique et de l'étude expérimentale préalable, le doctorant proposera des axes de recherche pour faire évoluer la physique du procédé en jouant sur :

- La nature du matériau de l'outil coupant et son affûtage ;
- Le type de lubrifiant utilisé (MQL, cryogénie CO₂...) ;
- La cinématique de l'opération (perçage vibratoire...).

Ces évolutions seront comparées à la situation du perçage de référence et les changements phénoménologiques induits seront investigués.

Références :

Bonnet, C., 2010. Compréhension des mécanismes de coupe lors du perçage à sec de l'empilage Ti6Al4V/Composite fibre de carbone (Thèse de doctorat). CLUNY, ENSAM.

Rahmé, P., Landon, Y., Lachaud, F., Piquet, R., Lagarrigue, P., 2011. Analytical models of composite material drilling. *Int J Adv Manuf Technol* 52, 609–617. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2773-5>

Benezech, L., Landon, Y., Rubio, W., 2011. Study of Manufacturing Defects and Tool Geometry Optimisation for Multi-Material Stack Drilling. *AMR* 423, 1–11. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.423.1>

Jallageas, J., 2013. Optimisation du perçage de multi-matériaux sur unité de perçage automatique (UPA) (Thèse de doctorat). Bordeaux 1.

Pecat, O., Brinksmeier, E., 2014. Low Damage Drilling of CFRP/Titanium Compound Materials for Fastening. *Procedia CIRP* 13, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.001>

Ramirez, C., 2014. Tool Wear Monitoring and Hole Surface Quality During CFRP Drilling. *Procedia CIRP* 6.

Jallageas, J., Ayfre, M., Cherif, M., K'nevez, J.-Y., Cahuc, O., 2015. Self-Adjusting Cutting Parameter Technique for Drilling Multi-Stacked Material. *SAE Int. J. Mater. Manf.* 9, 24–30. <https://doi.org/10.4271/2015-01-2502>

Ladonne, M., Cherif, M., Landon, Y., K'Nevez, J.-Y., Cahuc, O., de Castelbajac, C., 2015. Modelling the vibration-assisted drilling process: identification of influential phenomena. *Int J Adv Manuf Technol* 81, 1657–1666.

<https://doi.org/10.1007/s00170-015-7315-8>

Ramirez, C., Idhil Ismail, A., Gendarme, C., Dehmas, M., Aeby-Gautier, E., Poulachon, G., Rossi, F., 2017. Understanding the diffusion wear mechanisms of WC-10%Co carbide tools during dry machining of titanium alloys. *Wear* 390–391, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.07.003>

Lazoglu, I., Poulachon, G., Ramirez, C., Akmal, M., Marcon, B., Rossi, F., Outeiro, J.C., Krebs, M., 2017. Thermal analysis in Ti-6Al-4V drilling. *CIRP Annals* 66, 105–108. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.020>

Merzouki, J., 2018. étude des chargements thermomécaniques induits par le resserrement du trou en perçage du Ti6Al4V sous assistance cryogénique (Thèse de doctorat). Cluny, ENSAM.

Lorain, R., Olivier, L., Poggi, A., Valiorgue, F., Rech, J., 2019. Identification of friction coefficients when drilling titanium TiAl6V4. *Procedia CIRP* 82, 119–123.

<https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.004>

Xu, J., Ji, M., Paulo Davim, J., Chen, M., El Mansori, M., Krishnaraj, V., 2020. Comparative study of minimum quantity lubrication and dry drilling of CFRP/titanium stacks using TiAlN and diamond coated drills. *Composite Structures* 234, 111727.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111727>

Xu, J., Li, C., Chen, M., El Mansori, M., Paulo Davim, J., 2020. On the analysis of temperatures, surface morphologies and tool wear in drilling CFRP/Ti6Al4V stacks under different cutting sequence strategies. *Composite Structures* 234, 111708.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111708>

Rodríguez, A., Calleja, A., de Lacalle, L.N.L., Pereira, O., Rubio-Mateos, A., Rodríguez, G., 2021. Drilling of CFRP-Ti6Al4V stacks using CO₂-cryogenic cooling. *Journal of Manufacturing Processes* 64, 58–66.

<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.018>

Candidat :

Titulaire d'un master recherche ou diplôme d'ingénieur ayant attrait à l'étude des procédés de fabrication, de préférence lié au procédé d'usinage.

Localisation :

Ces travaux se dérouleront à 80% au sein du LaBoMaP à l'ENSAM de Cluny et 20% au sein du centre de recherche de TIVOLY basé à Saint-Etienne.

Financement :

CDD de 36 mois en convention CIFRE pour un salaire de 2700 € brut/mois.



Date de démarrage :

Octobre 2021

Conditions de candidature/recrutement :

Envoyer CV et lettre de motivation à G. Poulachon et R. Lorain.

gerard.poulachon@ensam.eu

raphael.lorain@tivoly.com